



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones

PROYECTO FIN DE CARRERA

# ESTUDIO DE UNA ANTENA UWB PARA EL RECHAZO DE UNA O DOS BANDAS DE FRECUENCIA

Autor: Clara Motos Pérez

Tutor: Luis de Inclán Sánchez

Leganés, julio de 2012



Título: ESTUDIO DE UNA ANTENA UWB PARA EL RECHAZO DE UNA O  
DOS BANDAS DE FRECUENCIA

Autor: Clara Motos Pérez

Director: Luis de Inclán Sánchez

## EL TRIBUNAL

Presidente: \_\_\_\_\_

Vocal: \_\_\_\_\_

Secretario: \_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día \_\_\_\_ de  
\_\_\_\_\_ de 20\_\_ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad  
Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



# Resumen

La tecnología UWB (*Ultra Wide Band*) está ganando aceptación y siendo propuesta para un gran número de aplicaciones. Es una tecnología con gran proyección y por este motivo se está potenciando su uso en la actualidad.

Este proyecto se enmarca en el diseño de antenas adecuadas para implementar sistemas de UWB. En particular se ha estudiado una antena impresa UWB que será simulada con el programa CST Studio Suite 2006. De esta manera, se analizará el comportamiento de la antena, que posee un gran ancho de banda situado en el marco de 2 a 13 GHz.

Debido a que el espectro utilizado es del orden de varios gigahercios, puede existir la posibilidad de que algunas frecuencias estén siendo utilizadas por otra aplicación. De esta manera se llega a la conclusión de que la introducción de un elemento resonante solucionaría este problema de interferencias. Esto se puede comprobar en el diseño de la antena, haciendo que no radie precisamente en esas frecuencias en concreto ni en sus frecuencias adyacentes.

Se ha comprobado mediante el estudio la posibilidad de eliminar dos bandas de frecuencia. La posición de las mismas puede modificarse en un cierto límite mediante la situación de los strips y su dimensión.

Se han fabricado dos prototipos de antena que posteriormente han sido medidas en el laboratorio. La finalidad de esta parte experimental es la de verificar el funcionamiento y las limitaciones de las antenas.

**Palabras clave:** UWB, banda ultraancha, banda rechazada, doble banda rechazada, notch



# Abstract

UWB technology (*Ultra Wide Band*) is gaining acceptance and being proposed for use in several number of areas. It's a technology with great future and its use is being promoted nowadays.

This project is framed in the design of suitable antennas to implement UWB systems. In particular, we have studied an UWB printed antenna that will be simulated with CST Studio Suite 2006. In this way, we will analyze the behavior of this antenna, which has a large bandwidth located from 2 to 13 GHz.

Because the used spectrum has about several gigahertz, it may be possible that some frequencies are being used by another application. In this way, we have come to the conclusion that the introduction of a resonant element would solve this interference problem. This can be tested in the antenna design, making it not just radiate at those frequencies or in adjacent frequencies.

We tested by studying the possibility of reject two frequency bands. The position of these bands can be modified in a certain limit by the position of the strips and its size.

Two antenna prototypes have been fabricated and measured in the laboratory. The purpose of this experimental part is to verify the performance and limitations of the antennas.

**Keywords:** UWB, ultrawideband, frequency band rejected, dual-band rejected, notch





# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción .....	1
1.2 Motivación y objetivos.....	7
1.3 Estructura del documento.....	10
<b>2. DESCRIPCIÓN Y ESTUDIO DE LA ANTENA INICIAL.....</b>	<b>11</b>
2.1 Posibilidades de estudio .....	11
2.2 Análisis de funcionamiento.....	16
2.3 Diagramas de radiación.....	22
2.4 Distribución de corriente.....	27
<b>3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA ANTENA FRENTE A VARIACIONES DE SUS PARÁMETROS .....</b>	<b>29</b>
3.1 Introducción .....	29
3.2 Modificaciones del plano de masa .....	30
3.3 Modificaciones de la anchura del strip.....	33
3.4 Modificaciones de la longitud del strip.....	39
3.5 Modificaciones de la posición del strip.....	45
3.6 Discusión de los resultados .....	51
3.7 Modificaciones según el número de strips .....	53

<b>4. MEDIDA DE LAS ANTENAS Y COMPARATIVA .....</b>	<b>60</b>
4.1 Antena con un strip .....	60
4.2 Antena con doble strip .....	64
<b>5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....</b>	<b>67</b>
5.1 Conclusiones .....	67
5.2 Líneas futuras .....	69

# Índice de figuras

FIGURA 1. CRONOLOGÍA REFERENTE A LA APARICIÓN DE UWB	2
FIGURA 2. COMPARACIÓN ENTRE VARIAS SEÑALES Y SUS RESPECTIVOS ANCHOS DE BANDA	3
FIGURA 3. COMPARACIÓN ENTRE UN ESQUEMA DE TRANSMISIÓN DE BANDA ESTRECHA (A) Y OTRO UWB (B)	4
FIGURA 4. COMPARACIÓN DE ANCHOS DE BANDA Y POTENCIAS DE VARIAS TECNOLOGÍAS.	4
FIGURA 5. COMPARACIÓN ENTRE ANCHOS DE BANDA DE UN SISTEMA DE BANDA ANCHA (SEÑAL AZUL) Y UNO DE BANDA ANCHA (SEÑAL ROJA)	5
FIGURA 6. CLASIFICACIÓN DE DISTINTAS TECNOLOGÍAS SEGÚN LA DISTANCIA Y LA TASA DE DATOS	5
FIGURA 7. ESTRUCTURA DE CAPAS DE UNA ANTENA IMPRESA	8
FIGURA 8. PRIMERA ANTENA: EVOLUCIÓN DE LA ESTRUCTURA BÁSICA DE LA ANTENA UWB	12
FIGURA 9. PRIMERA ANTENA: VISTA FRONTAL (A) Y TRASERA (B)	12
FIGURA 10. SEGUNDA ANTENA: ANTENA CON SLOT SIMPLE	14
FIGURA 11. SEGUNDA ANTENA: ANTENA CON DOBLE SLOT	14
FIGURA 12. TERCERA ANTENA: ANTENA VISTA FRONTALMENTE (A) Y LATERALMENTE (B)	15
FIGURA 13. ANTENA VISTA FRONTALMENTE Y EN PERSPECTIVA RESPECTIVAMENTE	16
FIGURA 14. PARÁMETROS S DE LA ANTENA	17
FIGURA 15. ROE DE LA ANTENA	18

FIGURA 16. GANANCIA DE LA ANTENA	20
FIGURA 17. VISUALIZACIÓN DE LOS PLANOS E Y H PARA UN DIPOLO POLARIZADO VERTICALMENTE	22
FIGURA 18. DEFINICIÓN VISUAL DE LOS ÁNGULOS THETA Y PHI	23
FIGURA 19. DIAGRAMAS DE RADIACIÓN EN EL PLANO H EN LAS FRECUENCIAS 4.5, 5.2, 6 Y 9 GHz RESPECTIVAMENTE	24
FIGURA 20. DIAGRAMAS DE RADIACIÓN EN EL PLANO E EN LAS FRECUENCIAS 4.5, 5.2, 6 Y 9 GHz RESPECTIVAMENTE	25
FIGURA 21. DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE DE LA ANTENA EN 3 GHz	27
FIGURA 22. DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE DE LA ANTENA EN 5.2 GHz	28
FIGURA 23. DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE DE LA ANTENA EN 6.5 GHz	28
FIGURA 24. VISUALIZACIÓN DEL PLANO DE MASA DE LA ANTENA CON NOTCH Y SIN NOTCH RESPECTIVAMENTE	30
FIGURA 25. PARÁMETROS S DE LA ANTENA SIN NOTCH	30
FIGURA 26. ROE DE LA ANTENA SIN NOTCH	31
FIGURA 27. GANANCIA DE LA ANTENA SIN NOTCH	32
FIGURA 28. ANTENA CON EL STRIP MÁS ANCHO	33
FIGURA 29. PARÁMETROS S DE LA ANTENA CON EL STRIP MÁS ANCHO	33
FIGURA 30. ROE DE LA ANTENA CON EL STRIP MÁS ANCHO	34
FIGURA 31. GANANCIA DE LA ANTENA CON EL STRIP MÁS ANCHO	35
FIGURA 32. ANTENA CON EL STRIP MÁS ESTRECHO	36
FIGURA 33. PARÁMETROS S DE LA ANTENA CON EL STRIP MÁS ESTRECHO	36
FIGURA 34. ROE DE LA ANTENA CON EL STRIP MÁS ESTRECHO	37
FIGURA 35. COMPARATIVA DE LAS GANANCIAS DE LA ANTENA CON EL STRIP MÁS ESTRECHO (AZUL) Y DE LA ANTENA CON EL STRIP MÁS ANCHO (ROJO)	38
FIGURA 36. ANTENA CON EL STRIP MÁS LARGO	39
FIGURA 37. PARÁMETROS S DE LA ANTENA CON EL STRIP MÁS LARGO	39
FIGURA 38. ROE DE LA ANTENA CON EL STRIP MÁS LARGO	40
FIGURA 39. GANANCIA DE LA ANTENA CON EL STRIP MÁS LARGO	41
FIGURA 40. ANTENA CON EL STRIP MÁS CORTO	42
FIGURA 41. PARÁMETROS S DE LA ANTENA CON EL STRIP MÁS CORTO	42
FIGURA 42. ROE DE LA ANTENA CON EL STRIP MÁS CORTO	43
FIGURA 43. COMPARATIVA DE LAS GANANCIAS DE LA ANTENA CON EL STRIP MÁS LARGO (ROJO) Y DE LA ANTENA CON EL STRIP MÁS CORTO (AZUL)	44
FIGURA 44. ANTENA CON EL STRIP DESPLAZADO SOBRE EL EJE X	45
FIGURA 45. PARÁMETROS S DE LA ANTENA CON EL STRIP DESPLAZADO SOBRE EL EJE X	45

FIGURA 46. ROE DE LA ANTENA CON EL STRIP DESPLAZADO SOBRE EL EJE X	46
FIGURA 47. GANANCIA DE LA ANTENA CON EL STRIP DESPLAZADO SOBRE EL EJE X	47
FIGURA 48. ANTENA CON EL STRIP DESPLAZADO SOBRE EL EJE Y	48
FIGURA 49. PARÁMETROS S DE LA ANTENA CON EL STRIP DESPLAZADO SOBRE EL EJE Y	48
FIGURA 50. ROE DE LA ANTENA CON EL STRIP DESPLAZADO SOBRE EL EJE Y	49
FIGURA 51. COMPARATIVA DE LAS GANANCIAS DE LA ANTENA CON EL STRIP DESPLAZADO SOBRE EL EJE Y (AZUL) Y DE LA ANTENA CON EL STRIP DESPLAZADO SOBRE EL EJE X (ROJO)	50
FIGURA 52. RELACIÓN ENTRE LARGO DEL STRIP Y LAS FRECUENCIAS RECHAZADAS	51
FIGURA 53. CONFIGURACIÓN DE LA PRIMERA ANTENA CON DOS STRIPS	53
FIGURA 54. ROE DE LA PRIMERA ANTENA CON DOS STRIPS	54
FIGURA 55. SEGUNDA ANTENA CON DOS STRIPS	55
FIGURA 56. ROE DE LA SEGUNDA ANTENA CON DOS STRIPS	55
FIGURA 57. TERCERA ANTENA CON DOS STRIPS	56
FIGURA 58. ROE DE LA TERCERA ANTENA CON DOS STRIPS	56
FIGURA 59. VISTA EN PERSPECTIVA DE LA ANTENA CON TRES STRIPS	58
FIGURA 60. PARÁMETROS S DE LA ANTENA CON TRES STRIPS	58
FIGURA 61. ROE DE LA ANTENA CON TRES STRIPS	59
FIGURA 62. ANTENA CON UN STRIP: VISTA DELANTERA Y TRASERA	61
FIGURA 63. PARÁMETROS S SIMULADOS Y MEDIDOS DE LA ANTENA CON STRIP SIMPLE	62
FIGURA 64. PARÁMETROS S SIMULADOS Y MEDIDOS DE LA ANTENA CON STRIP SIMPLE, ENTRE 4.5 GHz Y 6 GHz	63
FIGURA 65. ANTENA CON DOBLE STRIP: VISTA DELANTERA Y TRASERA	64
FIGURA 66. PARÁMETROS S SIMULADOS Y MEDIDOS DE LA ANTENA CON DOBLE STRIP	65

# Índice de tablas

TABLA 1. MEDIDAS DE LA ANTENA PROPUESTA EN EL ARTÍCULO.....	13
---	----



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Introducción

En los últimos años se está incrementando el estudio de las antenas de banda ultra ancha debido a la utilidad que ofrecen algunas de sus características. El interés en este tipo de antenas ha ido creciendo exponencialmente tras la aparición de la tecnología wireless, a la vez que ha aumentado el desarrollo de las aplicaciones que tienen relación con ellas: son las llamadas antenas UWB, siglas en inglés de *Ultra-Wideband*.

El inicio de la tecnología UWB se sitúa a partir de 1960 aunque la historia de la transmisión UWB es mucho mayor, ya que se remonta al final del siglo XIX. En ese mismo período de tiempo, la telegrafía estaba muy extendida aunque su uso era muy problemático cuando se precisaba para conexiones lejanas porque eran muy difíciles de construir y mantener debido al uso del cable. Sirva de ejemplo el hecho de que el mantenimiento de los cables transatlánticos en aquella época era muy costoso y requería mucho tiempo [Nikookar y Prasad; 2009].

Durante 1901, Guglielmo Marconi consiguió transmitir varias secuencias de código Morse de un lado del Océano Atlántico al otro. Este hecho fue muy importante en la historia de las comunicaciones inalámbricas y, por tanto, para UWB. Aproximadamente cincuenta años después, la transmisión basada en pulsos ganó importancia con el uso de radares en aplicaciones militares [Nekoogar; 2005].



Algunos de los pioneros de las comunicaciones UWB de finales de la década de los 60, fueron Henning Harmuth, Gerald Ross y K.W.Robins. Desde estos años hasta 1990, esta tecnología fue restringida a aplicaciones militares y de defensa, quedando reservada para actividades de alta seguridad. Es a partir de este año cuando varias empresas e instituciones perciben su enorme potencial para aplicaciones comerciales, orientadas tanto al mercado de redes de área personal (WPAN) como de área local (WLAN).

Por ello, cuando el uso de la señal UWB fue presentado para aplicaciones civiles aún no había ninguna definición para estas siglas. La agencia DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) propuso la primera definición para la señal UWB, basada en el ancho de banda fraccional ( $B_f$ ) de la señal, definiéndose éste como la división del ancho de banda de la señal entre la frecuencia central ( $f_c$ )

$$B_f = \frac{BW}{f_c} = \frac{(f_H - f_L)}{(f_H + f_L)/2}$$

donde  $f_H$  y  $f_L$  son las frecuencias transmitidas superior e inferior respectivamente en el punto en el cual se emiten -3 dB y BW es el ancho de banda de la señal [Taylor; 2005].

En febrero de 2002 fue cuando se produjo un hecho que cambió la utilización de esta tecnología: la FCC (*Federal Communications Commission*) publicó que UWB podría usarse en aplicaciones de datos al igual que para aplicaciones de seguridad o radares. Este organismo también proporcionó las primeras normas sobre las limitaciones de radiación que debían ofrecer estas antenas.

Todos estos desarrollos han sido posibles gracias al avance en paralelo de los microprocesadores. Por lo tanto, quizás sea más apropiado considerar UWB como un nuevo nombre para una tecnología que cuenta con una larga trayectoria.

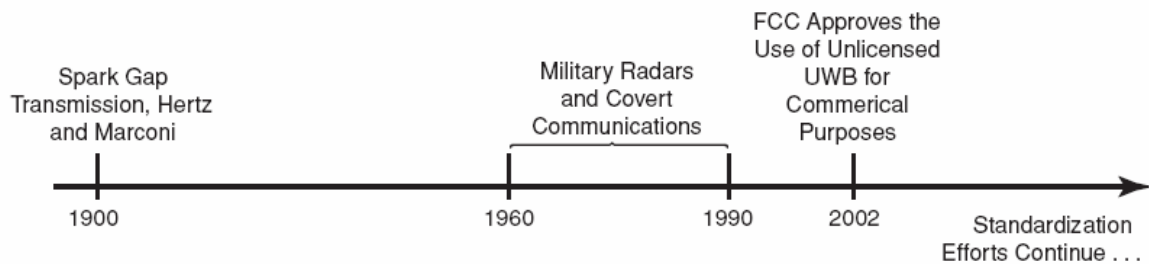


Figura 1. Cronología referente a la aparición de UWB

Así, la definición propuesta anteriormente para la transmisión UWB dejó paso a la publicada por la FCC. Esto es, el ancho de banda fraccional ( $B_f$ ) debe ser superior a 0.2 según la ecuación anterior o bien el ancho de banda de la señal será mayor a 500 MHz. En dicha ecuación,  $f_H$  y  $f_L$  serán las frecuencias mayor y menor del ancho de banda, respectivamente, a -10 dB [Nikookar y Prasad; 2009].

La banda asignada a las comunicaciones fue la comprendida entre 3.1 GHz y 10.6 GHz (7.5 GHz en total), la mayor asignación de ancho de banda para cualquier sistema terrestre comercial. La FCC asignó para UWB 1500 veces el espectro de una

simple licencia UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*). También afirmó que los niveles de potencia permitidos serían muy bajos para esta tecnología [Oppermann, Hämäläinen e Inatti; 2004].

Las antenas UWB se caracterizan por transmitir pulsos de muy corta duración con relativamente baja energía y una distorsión mínima, al contrario de lo que se consideraba hasta ahora comúnmente el esquema de comunicaciones, es decir, la transmisión de señales sinusoidales. Entre sus ventajas cabe destacar el gran ancho de banda que consiguen, como su nombre así lo indica. Este ancho de banda del sistema significa que UWB puede ofrecer también una tasa de datos del orden de Gbps.

En la siguiente figura se muestra una comparación entre varias señales enviadas y sus correspondientes anchos de banda, se observa cómo el ancho de banda se va haciendo más amplio cuando la señal enviada tiene menos duración.

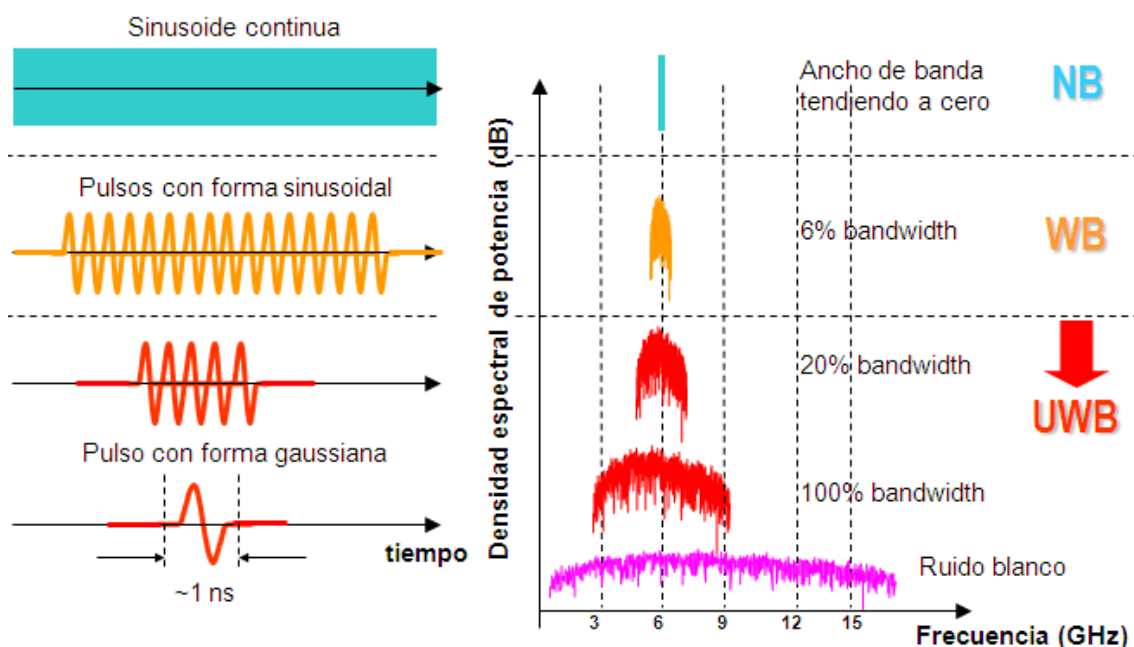


Figura 2. Comparación entre varias señales y sus respectivos anchos de banda

Otra de sus múltiples ventajas es su reducida complejidad y su bajo coste, a la vez que posee una buena resolución en el dominio del tiempo, lo que hace que sea un sistema muy requerido para aplicaciones de localización o seguimiento. Esta última característica es debida a que en un transmisor UWB no es necesario ningún oscilador local que convierta la señal a RF (Radio Frecuencia) y la amplifique para su envío, ya que produce un pulso muy corto en el dominio del tiempo, capaz de propagarse sin necesidad de elementos adicionales. La misma señal UWB se extiende por las frecuencias comúnmente usadas como frecuencias portadoras. En el receptor, por lo tanto, tampoco serán necesarias unidades intermedias como los osciladores, pues no será preciso hacer una reconversión para obtener la señal original transmitida.

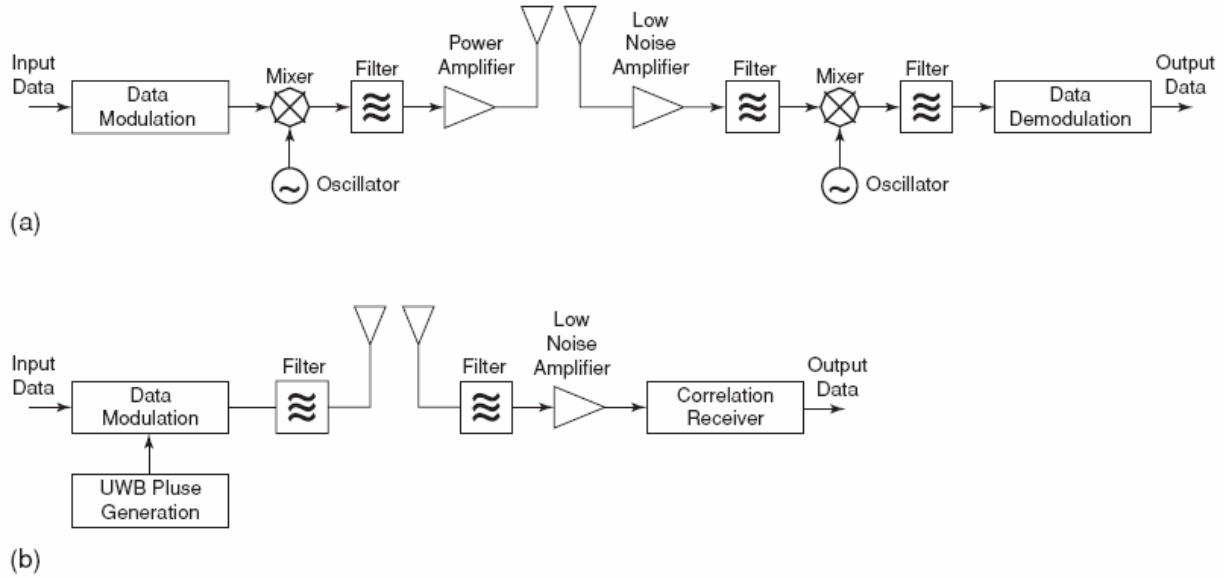


Figura 3. Comparación entre un esquema de transmisión de banda estrecha (a) y otro UWB (b)

En la Fig. 3 se visualiza lo explicado en el párrafo anterior. En ella se muestra un sistema de comunicaciones de banda estrecha y otro UWB. Éste último es más sencillo y se observa la desaparición de varios elementos intermedios entre el transmisor y el receptor con respecto al esquema de banda estrecha.

La mayoría de los sistemas actuales de banda estrecha tienen restricciones de funcionamiento en frecuencia, para evitar las interferencias con otros sistemas de comunicación. Por lo tanto, tienen requerimientos de licencia que son impuestos por la autoridad reguladora de comunicaciones que corresponda. En el lado contrario, las comunicaciones UWB usan una banda sin licencia. Esto, sin embargo, significa que se tiene que imponer una restricción con respecto al nivel de potencia para evitar los posibles perjuicios, en forma de interferencias, que se ocasionen con los sistemas existentes de banda estrecha [Shen, Guizani y Caiming; 2006].

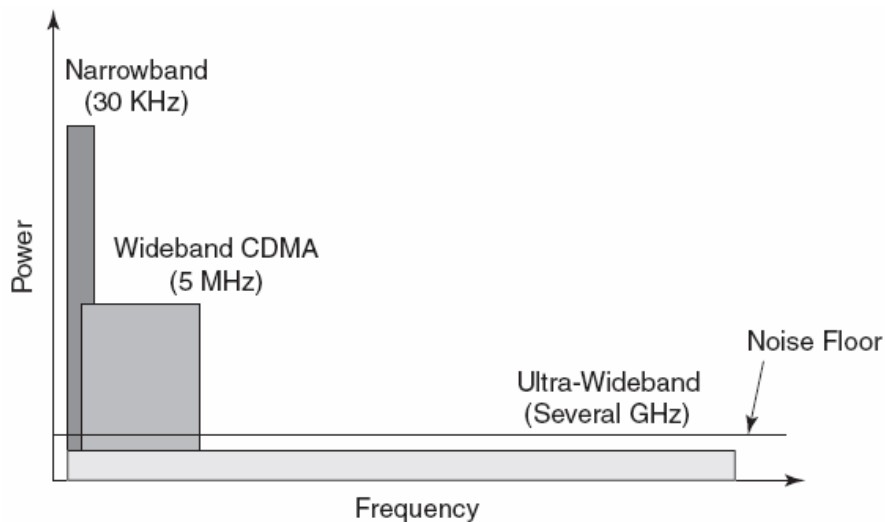


Figura 4. Comparación de anchos de banda y potencias de varias tecnologías.

UWB trabaja en las bandas con licencia existentes pero con una baja densidad energética de la señal transmitida (en realidad, por debajo del límite inferior de interferencia de los aparatos de radio tradicionales), con lo que los usuarios con licencia de dichas bandas, no experimentarán en la práctica ningún tipo de interferencia. Este fenómeno se puede observar en la Fig. 4, donde la potencia de la tecnología UWB está bajo la línea de potencia del ruido. El tema de las interferencias entre los impulsos y los sistemas existentes de radio es uno de los más importantes en la investigación actual UWB.

El gran ancho de banda conseguido ofrece (y también requiere) una diversidad de frecuencias enorme que, junto con la transmisión discontinua, hace que la señal UWB (por modulación en el tiempo) sea resistente a la propagación multitrayecto y a las interferencias.

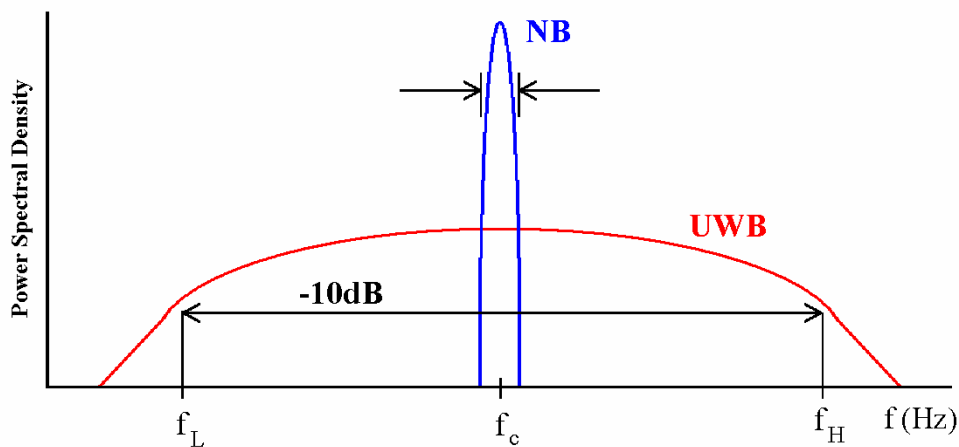


Figura 5. Comparación entre anchos de banda de un sistema de banda ancha (señal azul) y uno de banda ancha (señal roja)

Los sistemas de modulación en el tiempo ofrecen la posibilidad de utilizar una gran tasa de datos en las comunicaciones. Cientos de Mbps están presentes en los múltiples enlaces de comunicaciones de estos sistemas. Se estima (Time Domain Corporation, 1998; Kolenchery et al., 1997) que el número de usuarios en un sistema de comunicaciones por radio impulsos es mucho mayor que en un sistema convencional. Esta estimación ha sido validada para comunicaciones con baja y alta tasa de datos.

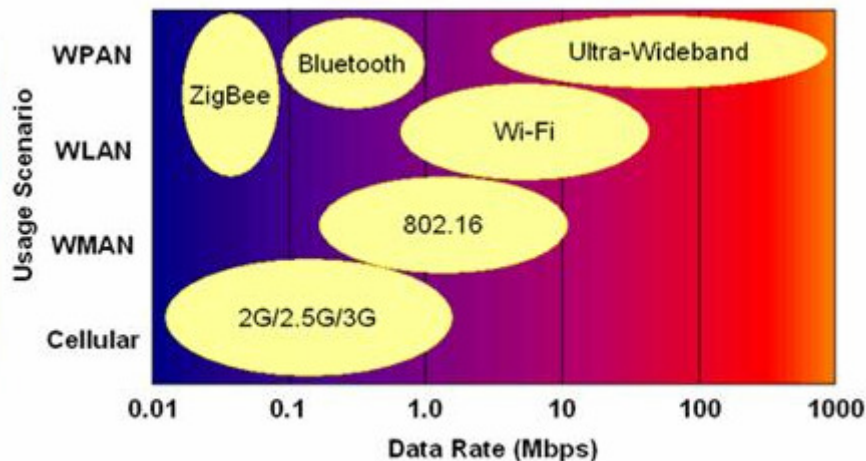


Figura 6. Clasificación de distintas tecnologías según la distancia y la tasa de datos

En la Fig. 6 se observa cómo UWB también tiene ciertos límites respecto a la distancia. Las distancias máximas soportadas estarán en torno a los 25 metros, siendo por lo tanto una tecnología prácticamente WPAN. Por ello, para aplicaciones WLAN que no tengan que ver con el radar o la localización, Wi-Fi será una alternativa generalmente más rentable, con un ancho de banda de hasta 54 Mbps y unas distancias cubiertas de más de 100 metros. Del mismo modo, para comunicaciones inalámbricas de área metropolitana (WMAN), WiMax (IEEE 802.16) es la mejor opción cubriendo distancias de hasta 50 Km. En el entorno WPAN, existen otros competidores, como Bluetooth, HomeRF o ZigBee, aunque una de las alternativas más atractiva en precio y prestaciones es sin lugar a dudas UWB [Millán; 2005].

Los sistemas UWB ofrecen una baja probabilidad de interceptación y detección, lo cual hacen que UWB sea adecuada para aplicaciones militares y de seguridad. Es de suma importancia la seguridad intrínseca que posee, puesto que es necesario conocer la secuencia de transmisión de los bits de información para poder escuchar las transmisiones. Además la relación señal/ruido es tan baja que las transmisiones son confundidas con ruido ambiente o ruido de fondo.

Existen multitud de empresas interesadas en la tecnología UWB, por lo que se espera que se progrese rápidamente en el desarrollo de circuitos de alta velocidad para las redes inalámbricas de área local.

UWB tiene la capacidad de situar objetos con una aproximación de centímetros, como consecuencia de la transmisión y recepción de datos entre muchos dispositivos dentro de una red inalámbrica de área local, por lo que también es útil en dispositivos de medida y localización, ya que obtiene tanta precisión o más que GPS (*Global Positioning System*), debido a la utilización de pulsos de dominio en el tiempo muy estrechos. Es decir, UWB puede triangular la situación de mercancías etiquetadas con un conjunto de transmisores, facilitando con ello su localización, además de que puede ser utilizado en interiores. Otra aplicación importante es la transmisión de imágenes para uso en telemedicina.

En estos momentos, además, se están realizando investigaciones para eliminar la batería de los futuros aparatos portátiles debido a la poca energía que necesitan, ya que en pleno funcionamiento un dispositivo UWB está la mayor parte del tiempo inactivo. Esto se debe a que la duración de los impulsos es mucho menor que el tiempo transcurrido entre los mismos, lo que unido a las restricciones debidas al cumplimiento de la normativa relativa a UWB, produce unos requisitos de energía extraordinariamente bajos. Esta energía para lograr su continuo funcionamiento se espera obtener del entorno, tal como los relojes de pulsera, ya sea por movimiento de dispositivo portátil, variaciones de temperatura o de presión atmosférica, etc.

## 1.2 Motivación y objetivos

Inicialmente los equipos UWB eran muy caros debido a que los componentes discretos que existían en los circuitos eran menos comunes y más costosos pero la situación ha cambiado radicalmente. Las señales UWB ofrecen garantías en las aplicaciones de corto alcance del radar, tales como operaciones de rescate y lucha contra la delincuencia, así como en la industria minera.

La tecnología inalámbrica UWB ha sido diseñada para su uso en redes de área personal de corto alcance con el objetivo de interconectar varios dispositivos entre sí, así como compartir datos, video, audio y voz entre ellos. De esta forma y a modo de ejemplo, se puede ver una película en la televisión enviada de forma inalámbrica desde un ordenador.

Tras haber expuesto en qué consiste UWB, surge la necesidad de disponer de una antena que cumpla los requisitos de la tecnología. La antena elegida ha sido extraída de un artículo del IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Una de las motivaciones es comprender el funcionamiento de esta antena, por ello en este proyecto se procede a su estudio. Esta antena es de banda ultraancho y tiene unas determinadas características en adaptación y en radiación que se evaluarán más adelante.

Dado que con UWB se consiguen unos anchos de banda tan sumamente grandes hay que contemplar la posibilidad de que alguna frecuencia en ese rango esté siendo ya utilizada por algún sistema inalámbrico o bien no queramos que la radiación interfiera con otras tecnologías WLAN como IEEE 802.11a. Así, ante su ancho de banda del orden de varios GHz, es preciso contar con la introducción de algún elemento resonante cuya misión sea la de rechazar unas determinadas bandas de frecuencia que puedan estar creando interferencias.

De esta manera, se observará hasta qué punto la antena del artículo permite rechazar dos bandas, así como se analizará el nivel de rechazo que alcanzan y su posible variación en frecuencias.

Por otra parte, una de las motivaciones es intentar profundizar en el estudio de la antena del artículo. Una cuestión interesante sería ver cuántas bandas de frecuencia se podrían rechazar respetando la estructura general y las dimensiones de la antena.

También sería interesante disponer de una antena UWB flexible donde se permitiera rechazar en bandas frecuenciales que pudieran seleccionarse.

Los objetivos que nos marcamos en este proyecto son, tomando como punto inicial una antena existente en el estado del arte con propiedades muy interesantes, estudiar y analizar su funcionamiento mediante un software de simulación electromagnética de onda completa.

Dicho estudio incluye la variación de algunos de sus parámetros con el fin de observar su respuesta en función de los mismos y de esta forma ofrecer y mejorar distintas prestaciones de interés para las comunicaciones inalámbricas de UWB.

Para ello contamos con una antena impresa. Estas antenas son relativamente baratas de fabricar y diseñar debido a la simple geometría física. Por lo general son empleadas en UHF (*Ultra High Frequency*) y frecuencias más altas debido a que el tamaño de la antena está directamente relacionado con la longitud de onda. Son usadas tanto en aplicaciones militares como en los sectores comerciales [Waterhouse; 2007].

Estas antenas se forman con un parche metálico dispuesto sobre un sustrato dieléctrico. La constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ) del sustrato necesita ser baja en pérdidas, particularmente para aplicaciones de alta frecuencia. Suele estar comprendida entre  $2.1 < \epsilon_r < 12$  aunque en ocasiones se utilizan constantes dieléctricas fuera de estos límites. Los sustratos con una constante dieléctrica cercana a la parte baja de este rango son los más aconsejables para lograr un apropiado funcionamiento de la antena, ya que proveen mejor eficiencia y mayor ancho de banda.

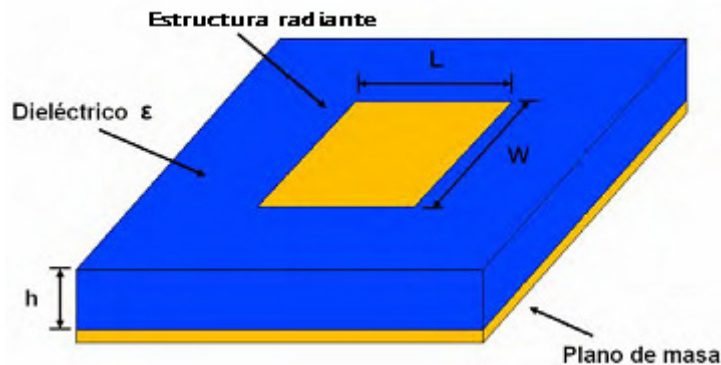


Figura 7. Estructura de capas de una antena impresa

Entonces, la antena simulada en este proyecto está compuesta por una base metálica de dimensiones reducidas, con un notch o ranura contenido en ella. Esta base se encarga de que decrezcan las pérdidas y, por lo tanto, aumente la eficiencia. También consta de un plano dieléctrico y encima de éste la estructura radiante, construida en forma de U. El diseño elegido se verá más detalladamente en el próximo capítulo.

Se estudiará el efecto de dicho notch y se modificarán varios parámetros para observar de qué manera influyen en los resultados.

Por lo tanto, el objetivo de este proyecto es estudiar el modo de funcionamiento y la adaptación de la antena impresa elegida. Para ello nos hemos basado en diferentes casos y medidas de la misma. En cada uno de estos casos se comprobará la adaptabilidad de la antena y su ganancia entre otras características.

Se realizará también los estudios resultantes de añadir a la antena inicial otros strips con el fin de lograr que rechace varias bandas de frecuencias.

Otro de nuestros objetivos es construir varios prototipos de antena, medirlos y presentar una comparativa con las simulaciones realizadas para así comprender las diferencias y similitudes entre ambos casos.



## 1.3 Estructura del documento

El documento está dividido en varios capítulos y éstos a su vez en distintas secciones según se describe en lo que sigue.

La estructura del documento se compone de cinco capítulos:

El primero de ellos [[capítulo 1](#)] es el de introducción a la tecnología UWB, tanto su historia, como características y posibles aplicaciones. En él también se encuentra la motivación del trabajo a desarrollar a lo largo de estas páginas y los objetivos que se quieren conseguir con ello.

El segundo capítulo [[capítulo 2](#)] está dedicado a la elección de la antena a estudiar entre un abanico de tres antenas UWB con unas características similares. A continuación, se hace un estudio en profundidad de la antena elegida, procedente de un artículo publicado en la IEEE y se comparan los resultados simulados con los obtenidos en dicho artículo.

En el capítulo 3 [[capítulo 3](#)] se lleva a cabo un estudio paramétrico, resultado de hacer algunos cambios en las dimensiones de la antena para observar en qué medida afectan los parámetros modificados. También se añadirán elementos resonantes con el fin de comprobar el efecto sobre la antena.

En el siguiente capítulo [[capítulo 4](#)] se plasmarán los resultados obtenidos en el laboratorio tras medir y evaluar la antena físicamente. Se efectuará un estudio comparativo de dichos resultados con los logrados en las simulaciones.

Por último, en el capítulo 5 [[capítulo 5](#)] se recogen las conclusiones y los puntos más importantes tratados en el proyecto, destacando también las posibles líneas de investigación que podrían ser abordadas en un futuro.

# Capítulo 2

## Descripción y estudio de la antena inicial

### 2.1 Posibilidades de estudio

Muchos de los diseños de antenas UWB que permiten reducir la señal emitida en ciertas frecuencias, rechazan sólo una banda de frecuencias. Esto se debe a que las antenas de este tipo tienden a tener un tamaño mayor. Otro punto a destacar es que algunas de estas antenas rechazan demasiado ancho de banda, por encima de 2 GHz. Por lo tanto, uno de los principales problemas del rechazo frecuencial es la dificultad de controlar el ancho de banda que se rechaza.

La elección de la antena UWB que vamos a estudiar es el resultado de considerar diferentes artículos publicados en el IEEE, con resultados similares a los que buscamos en el proyecto. Es decir, todas ellas cumplen con la idea del rechazo de una banda frecuencial e incluso la posibilidad de rechazar en más de una.

A continuación se muestran algunas de las antenas que se han encontrado y cumplen estos requisitos y, por lo tanto, consideradas para desarrollar este trabajo. De entre ellas se eligió la antena que consideramos el punto de inicio de este estudio.

La primera de ellas es la publicada en el IEEE en 2009 en el artículo “UWB Antenna With Single or Dual Band-Notches for Lower WLAN Band and Upper WLAN Band” [Ryu y Kishk; 2009].

Esta antena está compuesta de un strip situado entre la estructura radiante en forma de U. El plano metálico trasero tiene dos aspectos interesantes, como son las dimensiones y en mayor medida, el notch o ranura.

La Fig. 8 muestra la evolución de la estructura radiante de esta antena. La Fig. 8 (a) muestra la antena UWB formada por una estructura rectangular. Sin embargo, en la Fig. 8 (b) se observa que dicha estructura ha cambiado, de manera que en este caso tiene forma de U. Usando la estructura radiante de la Fig. 8 (b), se pudo reducir el tamaño de la antena impresa. La mayoría de la corriente estará concentrada alrededor de las partes más estrechas de dicha estructura.

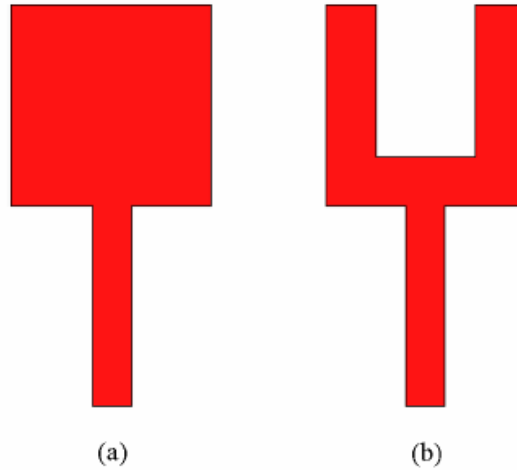


Figura 8. Primera antena: evolución de la estructura básica de la antena UWB

En la Fig. 9 se muestra la configuración de la antena UWB de este artículo.

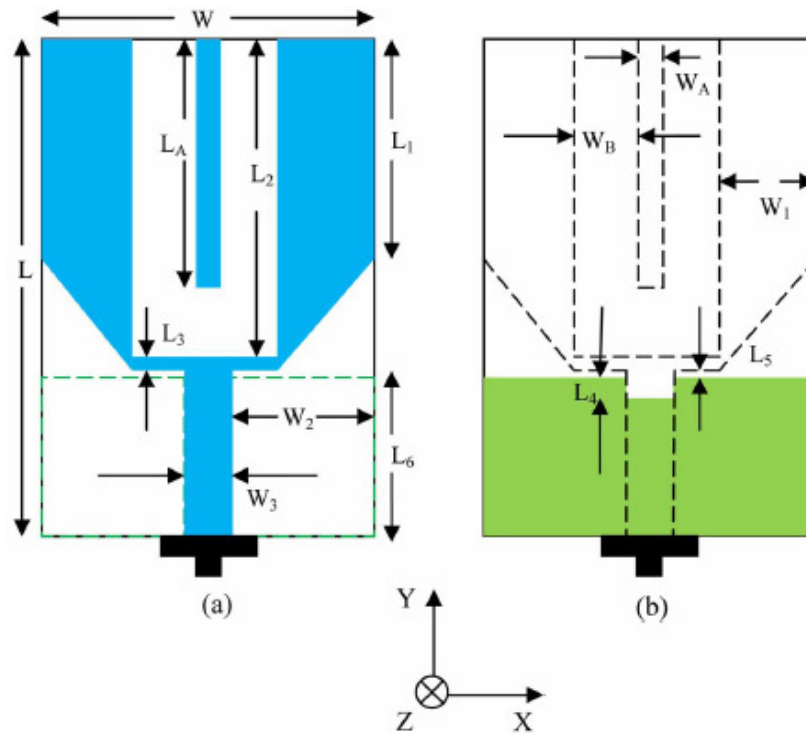


Figura 9. Primera antena: vista frontal (a) y trasera (b)

En la tabla adjunta se muestran las medidas de la antena.

Parámetros	Medidas (mm)
L	36
La	*
L1	16
L2	22.7
L3	1.3
L4	1.5
L5	0.5
L6	11.5
W	24
Wa, Wb	*
W1	6.5
W2	10.25
W3	3.5

**Tabla 1.** Medidas de la primera antena propuesta

*\* La longitud de estos parámetros es variable*

Uno de los retos de la tecnología UWB es asegurar la coexistencia con otros sistemas que operan en la misma banda. Es por esta causa por lo que en el diseño de la antena anterior se incluye un strip radiante. El efecto que tiene este strip es el del rechazo de una determinada banda de frecuencias, siempre considerablemente inferior al ancho de banda total resultante de la operación de la antena. En el caso del rechazo de una doble banda de frecuencias, se añadiría un segundo strip a la estructura radiante de la antena.

La siguiente antena que se consideró se presenta en la Fig. 10 y procede del artículo publicado en la IEEE “Single and dual band-notched UWB monopole antenas with U-shaped slot” en 2010 [Shaalán y Ramadan; 2010]. Las dimensiones son muy similares a las de la anterior antena.

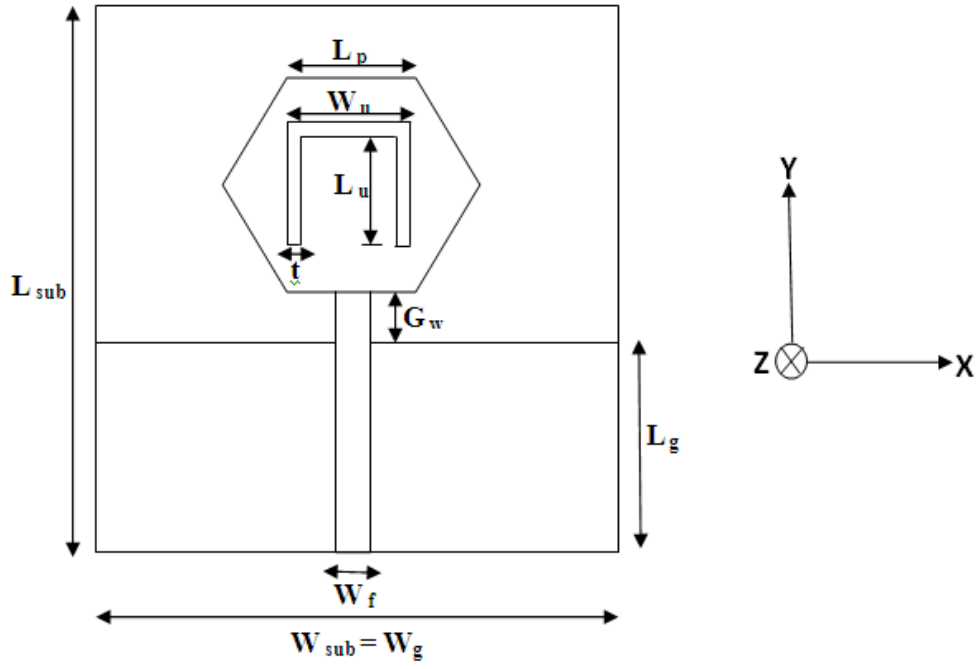


Figura 10. Segunda antena: antena con slot simple

Su finalidad es básicamente la explicada al comienzo del apartado. En este artículo también han modificado los parámetros de la ranura en forma de U invertida, mostrando los diferentes resultados y sus consecuencias.

En el caso de querer rechazar dos bandas de frecuencias la antena estaría formada por una doble ranura con forma de U, uno conteniendo al otro, como se muestra en la siguiente figura.

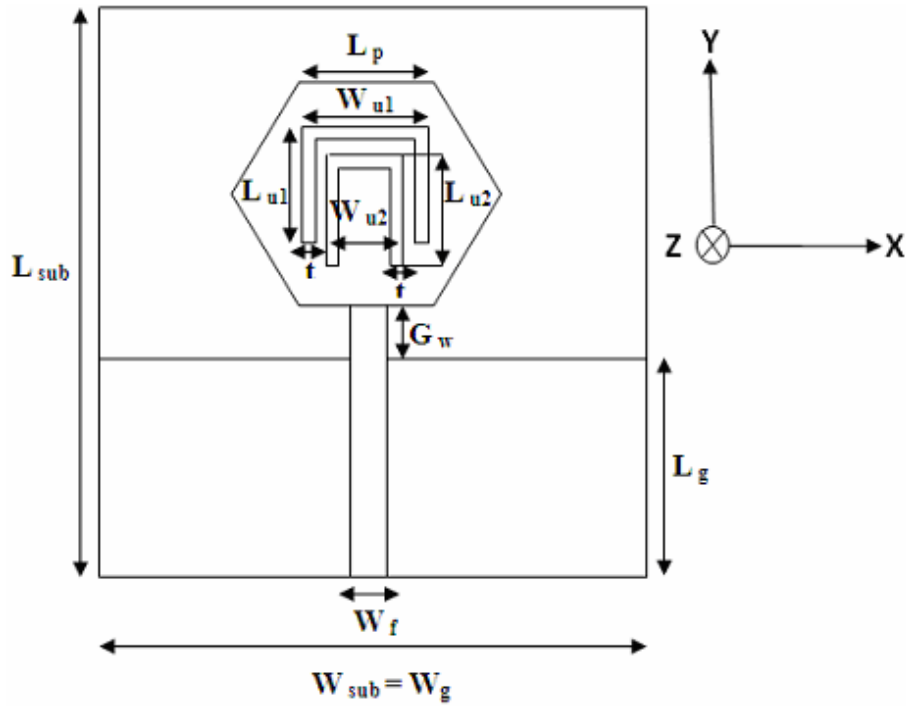


Figura 11. Segunda antena: antena con doble slot

La tercera y última antena que se consideró para decidir en cuál de ellas basar el proyecto fue la antena desarrollada en el artículo “UWB antenna with single or dual band-notched characteristic for WLAN band using meandered ground stubs”, publicado también en el IEEE [Weng, Lu, Cheung y Yuk; 2009].

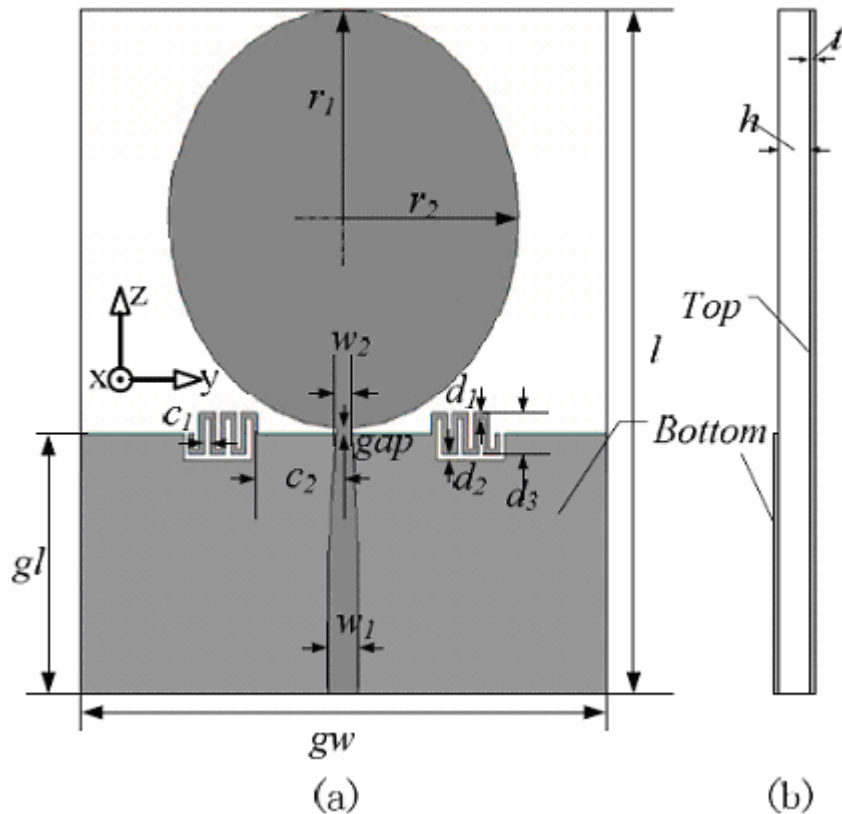


Figura 12. Tercera antena: antena vista frontalmente (a) y lateralmente (b)

Su funcionamiento es análogo a las anteriores. El punto atrayente de esta antena son las ranuras que posee, de forma serpenteante. De ellas dependerán las bandas de frecuencias rechazadas, según se modifican sus parámetros  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  y/o  $d_3$ .

La elección final, y en consecuencia el origen del proyecto, fue resultado de la evaluación de estas tres antenas. Dado que todas cumplían con las características que se querían analizar en el proyecto, se optó por la primera antena, correspondiente al artículo “UWB Antenna With Single or Dual Band-Notches for Lower WLAN Band and Upper WLAN Band”.

Dicha elección se produjo debido al interés suscitado tanto por el notch que incluye el plano de masa como por las distintas modificaciones que se podrían llevar a cabo con los diferentes parámetros del strip.

Las dos antenas descartadas no se analizarán debido a que el proyecto sería demasiado complejo.

## 2.2 Análisis de funcionamiento

La antena ilustrada en la Fig. 9 se trata, como se ha dicho anteriormente, de una antena impresa UWB. Está compuesta por un plano metálico trasero con unas dimensiones de  $24 \times 11.5 \text{ mm}^2$  y se caracteriza por tener una ranura centrada en el eje x, a la que también se denomina notch.

Por encima este plano se encuentra un plano de material dieléctrico de dimensiones  $24 \times 36 \text{ mm}^2$ . Se compone de un sustrato con una constante dieléctrica  $\epsilon_r$  de 3.38 y un grosor de 1.52 mm. La  $\epsilon_r$  de una antena impresa, como se ha visto en el capítulo introductorio, está comprendida frecuentemente entre  $2.1 < \epsilon_r < 12$ . Por último, la antena está compuesta por otro plano en el que se encuentra la capa radiante.

A continuación se muestra el modelo implementado en la herramienta “CST STUDIO SUITE 2006”. Las dimensiones de los diferentes planos y de la estructura radiante son los recogidos en el artículo del IEEE. En la [Tabla 1](#) del apartado anterior se pueden consultar dichas medidas. Para los parámetros cuya longitud se va a modificar, se han elegido unos valores de  $L_a = 16 \text{ mm}$ ,  $W_a = 3 \text{ mm}$  y  $W_b = 4 \text{ mm}$ . La anchura del strip, según la figura 8, es de 3 mm.

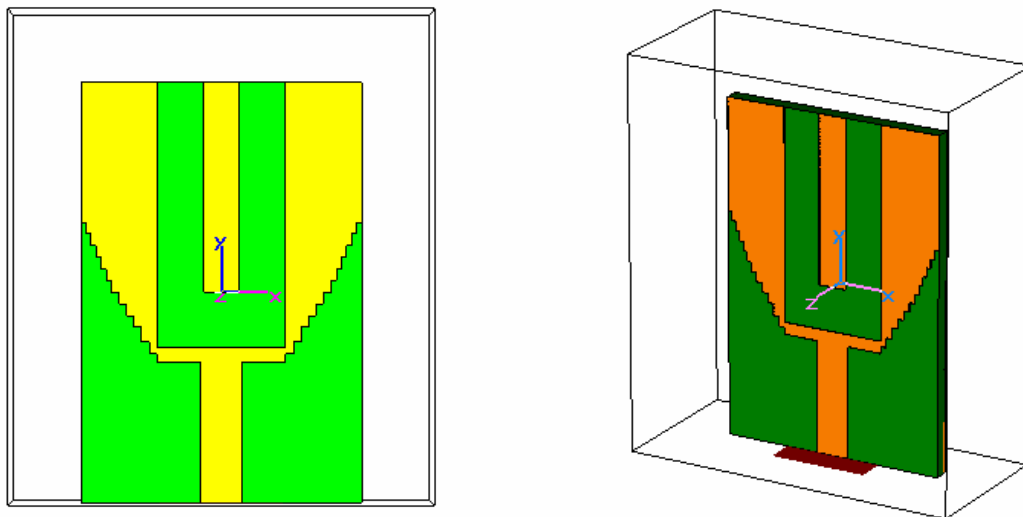


Figura 13. Antena vista frontalmente y en perspectiva respectivamente

Se ha procedido a realizar distintas simulaciones de la antena con el programa mencionado y el resultado ha sido la obtención de diferentes gráficas en las que se observan sus principales características. Seguidamente se revisará cada uno de los conceptos que se pueden extraer a partir de las simulaciones realizadas.

Uno de los aspectos más relevantes cuando se habla de antenas es el de coeficiente de reflexión, que se identifica con el parámetro S11. Este coeficiente describe la amplitud de una onda reflejada respecto a la onda incidente. El coeficiente de reflexión  $\Gamma$  viene dado por:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

donde  $Z_L$  es la impedancia de carga al final de la línea (en este caso la impedancia que presenta la antena) y  $Z_0$  es la impedancia característica de la línea de transmisión.

Un coeficiente en módulo igual a 1 (0 dB) indica que toda la señal se refleja (el caso por ejemplo, de una línea abierta, sin carga en el extremo receptor) y un coeficiente de 0 indica que toda la potencia se entrega, aunque este último caso no es real ya que nunca se puede conseguir [Kraus; 1988].

La antena bajo estudio debe satisfacer los requerimientos de ancho de banda en los sistemas wireless y UWB. Hay dos criterios fundamentales que la antena debe cumplir: el ancho de banda en impedancia y su ganancia. No existe ningún criterio absoluto que se aplique a todos los sistemas, pero normalmente una antena se considera adaptada si el coeficiente de reflexión es menor que -10 dB, lo cual significa que se refleja menos del 10% de la potencia [Waterhouse; 2007].

A partir de estas definiciones, comenzamos con la evaluación de las figuras resultantes de la simulación de la antena.

En esta primera gráfica se observa el valor del coeficiente de reflexión frente a la frecuencia. Valorando este coeficiente se logra observar cómo es la adaptación de la antena y las zonas donde la adaptación es mayor o menor. En los lugares donde se alcanzan los valores más altos, la antena estará peor adaptada.

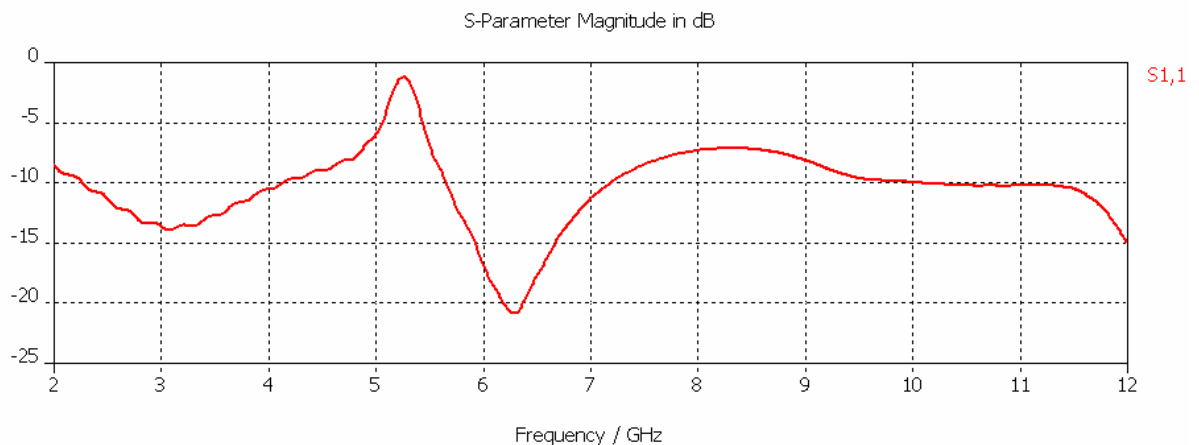


Figura 14. Parámetros S de la antena



Tras visualizar la curva, se observa cómo en la frecuencia de 5.3 GHz aproximadamente el coeficiente de reflexión es más alto, teniendo en ese punto su máximo. Este pico alcanza los -1.5 dB, con lo que se encuentra fuertemente desadaptado. Esto quiere decir que es en esta frecuencia donde más energía se refleja.

A partir de la gráfica anterior, se obtiene la figura que relaciona la frecuencia con la ROE (*Razón de Onda Estacionaria*), definiéndola como la relación que existe entre la tensión máxima y mínima en la entrada de línea de la antena. La ROE es un número real comprendido entre 1 e infinito, donde este valor mínimo se correspondería con el caso donde el coeficiente de reflexión fuese muy próximo a 0.

La ROE se puede calcular mediante la relación:

$$ROE = VSWR = \frac{V_{MAX}}{V_{MIN}} = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|} = \frac{1 + \rho_L}{1 - \rho_L}$$

siendo  $|\Gamma|$  el coeficiente de reflexión en módulo y definiendo VSWR como “*Voltage Standing Wave Ratio*”, otro modo de referirse a la ROE.

Para este cálculo ha sido necesario el uso de Matlab, con el que se han desarrollado varios aspectos del proyecto.

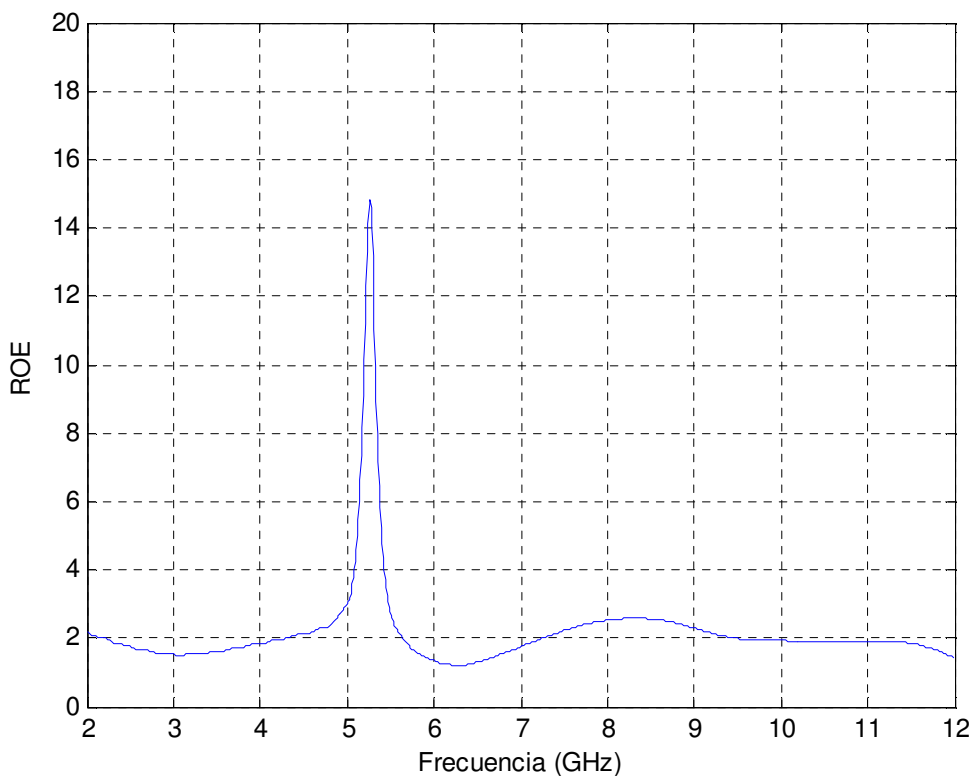


Figura 15. ROE de la antena

A la vista de esta gráfica se aprecia que en las frecuencias próximas a 5.3 GHz se produce un incremento muy notable de la ROE. A partir de este dato se puede deducir que existe una gran cantidad de energía que no se entrega a la antena, sino que se rechaza. Por lo tanto, se concluye que en esta frecuencia la antena radiará muy poco o incluso no lo hará debido a la desadaptación.

Así se evitarían posibles interferencias en esta zona de frecuencias. El comportamiento filtrante en esta banda se debe a la forma de la antena, en particular a la tira que se incorpora en su estructura en forma U.

Para continuar con el análisis de la antena es necesario observar la ganancia que tiene en sus diferentes frecuencias. La ganancia refleja directamente lo que radia la antena. En las frecuencias rechazadas se espera que la ganancia disminuya para volver a aumentar cuando la antena vuelva a radiar sin el efecto del elemento resonador. La ganancia se convierte, por lo tanto, en el otro parámetro de diseño crítico en este caso. Para definirla previamente se debe hacer mención a la directividad.

La directividad según la IEC (*Comisión Electrotécnica Internacional*) es “la relación entre la intensidad de la radiación en una dirección dada de la antena y la intensidad de la radiación media en todas las direcciones. Esta intensidad media es igual a la energía total radiada por la antena dividida por  $4\pi$ ”. Dicho de forma más sencilla, la directividad de una fuente no isotrópica es igual a la relación de la intensidad de radiación en una dirección dada respecto a una fuente isotrópica.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{\text{rad}}}$$

siendo  $D$  la directividad de la antena,  $U$  la intensidad de radiación,  $U_0$  la intensidad de radiación de una fuente isotrópica y  $P_{\text{rad}}$  el total de la potencia radiada.

La directividad no tiene en cuenta las posibles pérdidas en la antena, sólo considera la distribución espacial de la energía radiada. De esta manera, no aporta información sobre la energía que entra en la antena. Se define la ganancia de una antena como:

$$\text{Gain} = 4\pi \frac{\text{radiation intensity}}{\text{total input (accepted) power}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{\text{in}}}$$

La relación, por tanto, que existe entre directividad y ganancia es:

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} D(\theta, \phi)$$

siendo  $G(\theta, \phi)$  la ganancia,  $D(\theta, \phi)$  la directividad,  $P_{\text{in}}$  la potencia de entrada a la antena y  $e_{cd}$  la eficiencia de los conductores y del dieléctrico.

Hay un tipo de ganancia que tiene en cuenta las pérdidas por desadaptación y reflexión. Nos referimos a ella como ganancia total o realizada  $G_{abs}(\theta, \phi)$ . Se define como:

$$\begin{aligned} G_{abs}(\theta, \phi) &= e_r G(\theta, \phi) = (1 - |\Gamma|^2) G(\theta, \phi) \\ &= e_r e_{cd} D(\theta, \phi) = e_o D(\theta, \phi) \end{aligned}$$

definiendo  $e_r$  como la eficiencia de reflexión y  $e_o$  como la eficiencia total, que es el resultado del producto de los tres tipos de eficiencias [Balanis; 2005].

Particularmente, en el caso de la antena que se está examinando en este apartado, y después de conocer teóricamente todos estos nuevos términos, se procede al estudio de su ganancia.

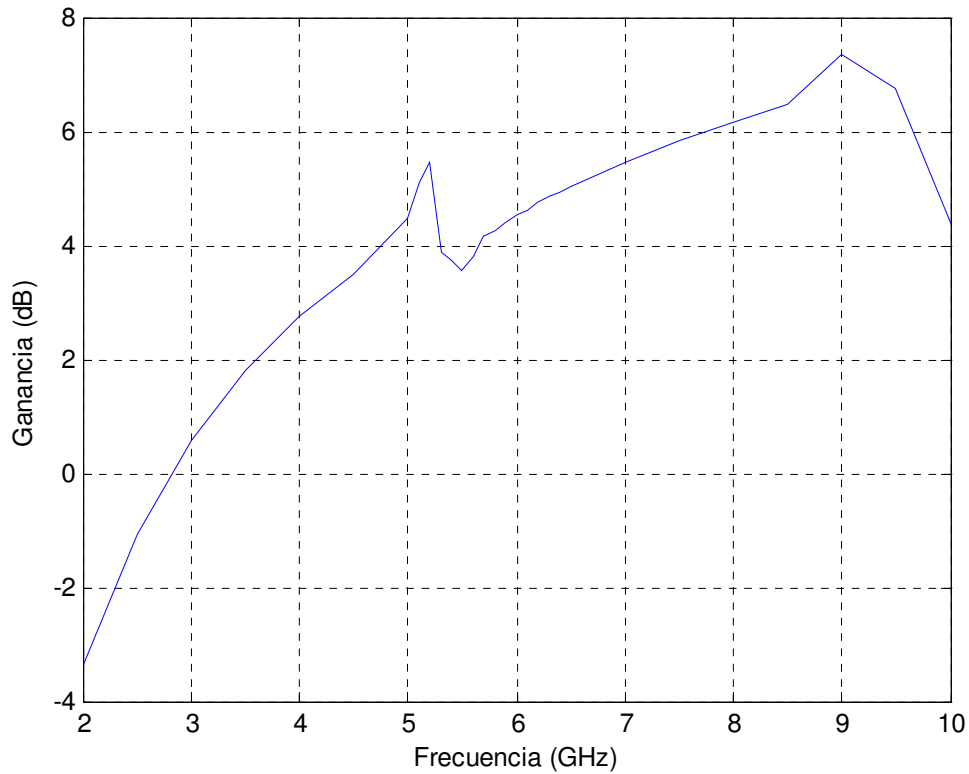


Figura 16. Ganancia de la antena

Esta gráfica es resultado de las simulaciones del programa CST Studio Suite 2006 y de su procesamiento mediante la herramienta matemática Matlab. Para su obtención se ha calculado la ganancia obtenida en un gran número de puntos frecuenciales de la banda de trabajo.

Ya se ha comentado el comportamiento esperado de la ganancia: se incrementa gradualmente hasta llegar a la banda que se pretende evitar en el eje de las frecuencias. Alrededor de 5.2 GHz aproximadamente, que es donde se encuentra el mayor rechazo,

se observa como disminuye 2 dB. Al sobrepasar esta zona, la ganancia vuelve a aumentar haciendo que la antena radie con una ganancia mayor.

Esta ganancia es muy similar a la que obtenían en el artículo, con la diferencia que tiene valores ligeramente mayores.

## 2.3 Diagramas de radiación

Una antena no radia por igual en todas las direcciones del espacio, sino que según su geometría, dimensiones o forma de excitación es capaz de orientar la energía en unas determinadas direcciones.

El diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades direccionales de radiación de una antena. Éste se expresará en la región del campo lejano a partir de la expresión del campo eléctrico en función de las variables angulares  $\theta$  y  $\phi$ . Como el campo magnético se deriva directamente del eléctrico, la representación podría realizarse a partir de cualquiera de los dos, siendo norma habitual que los diagramas se refieran al campo eléctrico.

Por lo tanto, para entender mejor cómo es el funcionamiento de la antena, hay que estudiar también estos diagramas de radiación en distintas frecuencias. Las frecuencias elegidas para llevarlo a cabo son: 4.5 GHz, 5.2 GHz, 6 GHz y 9 GHz, correspondientes a una frecuencia anterior a la banda rechazada, dos frecuencias muy cercanas a esta banda y otra posterior, lejana a la banda rechazada, respectivamente.

Es necesario observar los diagramas de radiación en los dos planos principales de la antena: el plano H y el plano E. Para antenas linealmente polarizadas se define el plano E como el que forman la dirección de máxima radiación y la dirección que contiene al campo eléctrico. Análogamente, el plano H es el formado por la dirección de máxima radiación y la dirección que contiene al campo magnético. Ambos planos son perpendiculares entre sí y su intersección determina una línea que define la dirección de máxima radiación de la antena.

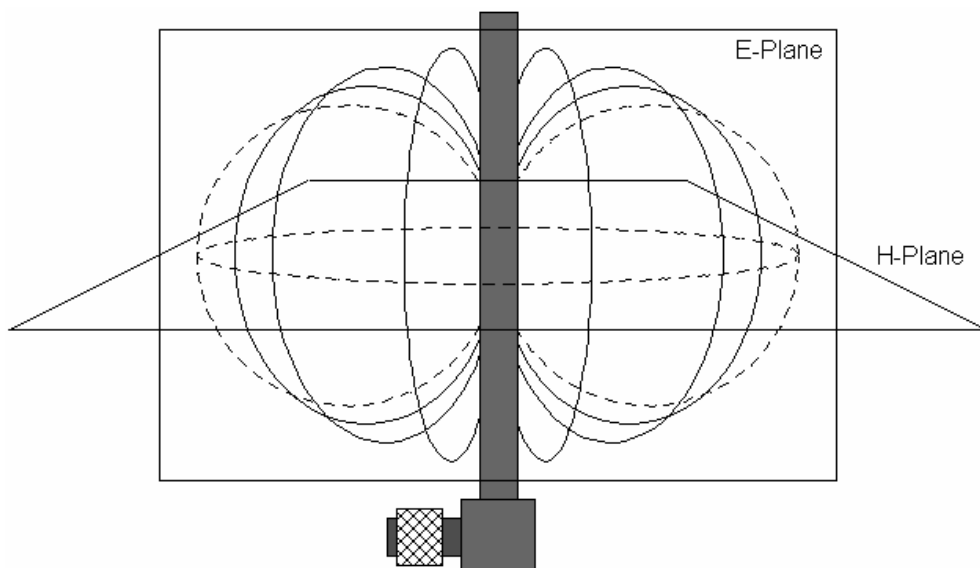


Figura 17. Visualización de los planos E y H para un dipolo polarizado verticalmente

Si bien la información de la radiación es tridimensional, puede ser de interés, y en la mayoría de los casos suficiente, representar algunos cortes del diagrama. Los cortes pueden hacerse de diversas formas. Los más habituales son los que siguen los meridianos en una hipotética esfera (cortes para  $\theta$  constante) o los paralelos (cortes para  $\phi$  constante). La información de todos los cortes del diagrama es excesiva, por lo que se recurre a representar dicha información sólo en los planos principales [Bataller, Blanch, Cardama, Jofre y Robert; 2002].

Para calcular los diagramas de radiación que interesen es necesario indicar los ángulos que van a permanecer fijos y cuáles van a ser variables. Los ángulos a tener en cuenta son los ángulos theta  $\theta$  y phi  $\Phi$ . En la siguiente figura se definen, de manera que ya se pueden utilizar en nuestro diseño teniendo especial cuidado con la colocación de la antena según los diferentes ejes.

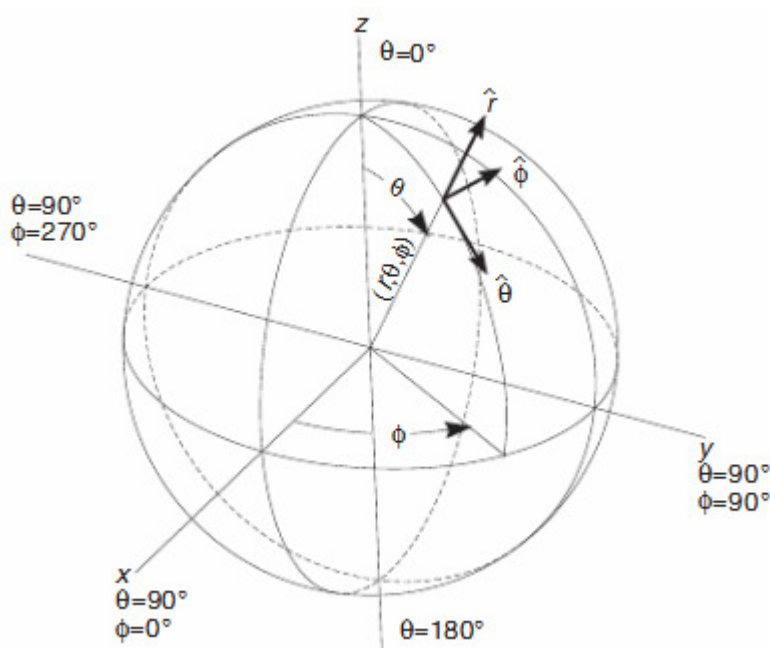


Figura 18. Definición visual de los ángulos theta y phi

Volviendo al caso particular del proyecto, se observa que la estructura de la antena está situada en el plano XY y tiene una polarización según el eje y debido a que el monopolo está contenido en dicha dirección. Por lo tanto, el plano H es el correspondiente al plano XZ y el plano E es el plano YZ.

Dicho esto, a continuación se evalúan ambos planos en distintas frecuencias, viendo cómo el campo de radiación depende de la frecuencia.

El plano H, como se ha dicho teniendo en cuenta la colocación de la antena, se corresponde con el plano XZ. De acuerdo con la Fig. 17, para conseguir ese plano en función de los ángulos theta y phi, hay que fijar este último en  $\phi = 0$ . Respecto al ángulo theta, el resultado de obtener el plano XZ será el correspondiente a ir barriendo dicho ángulo, con todos sus posibles valores.

### Plano H (XZ)

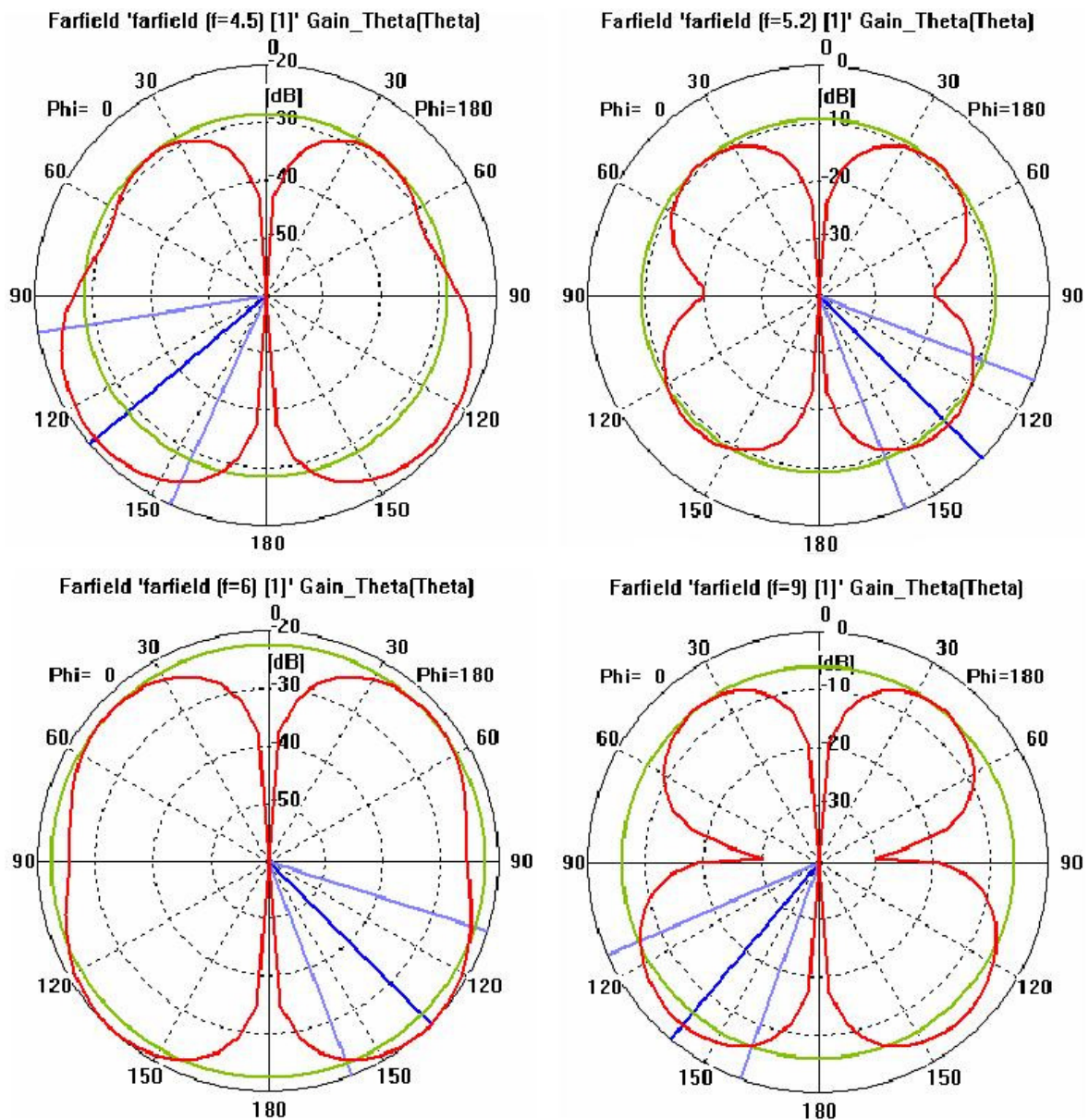


Figura 19. Diagramas de radiación en el plano H en las frecuencias 4.5, 5.2, 6 y 9 GHz respectivamente

La radiación de una antena en una polarización especificada se denomina polarización de referencia o copolarización, mientras que a la radiación en la polarización ortogonal se le conoce como polarización cruzada o contrapolar. Depende de la aplicación, pero en general interesa que la componente cruzada sea lo menor posible.

En esta figura, la radiación en color rojo es la referente a esta polarización indeseada en el plano H. La radiación en color verde se corresponde con la copolarización.



En la Fig. 19 se observa que la copolarización en la mayoría de las frecuencias y en la mayor parte de las direcciones, es mayor a la polarización cruzada, que es lo que se desea en todo momento para la obtención de una buena antena.

También comprobamos que en las diferentes frecuencias el diagrama de radiación es muy parecido, con lo que la antena se puede considerar estable en la mayoría de las frecuencias de su banda.

Igualmente se procede para el plano E, que en este caso se corresponde con el plano YZ. Para este caso tomamos el valor de  $\phi=90$  y de nuevo se barrerá la radiación según el ángulo theta.

### *Plano E (YZ)*

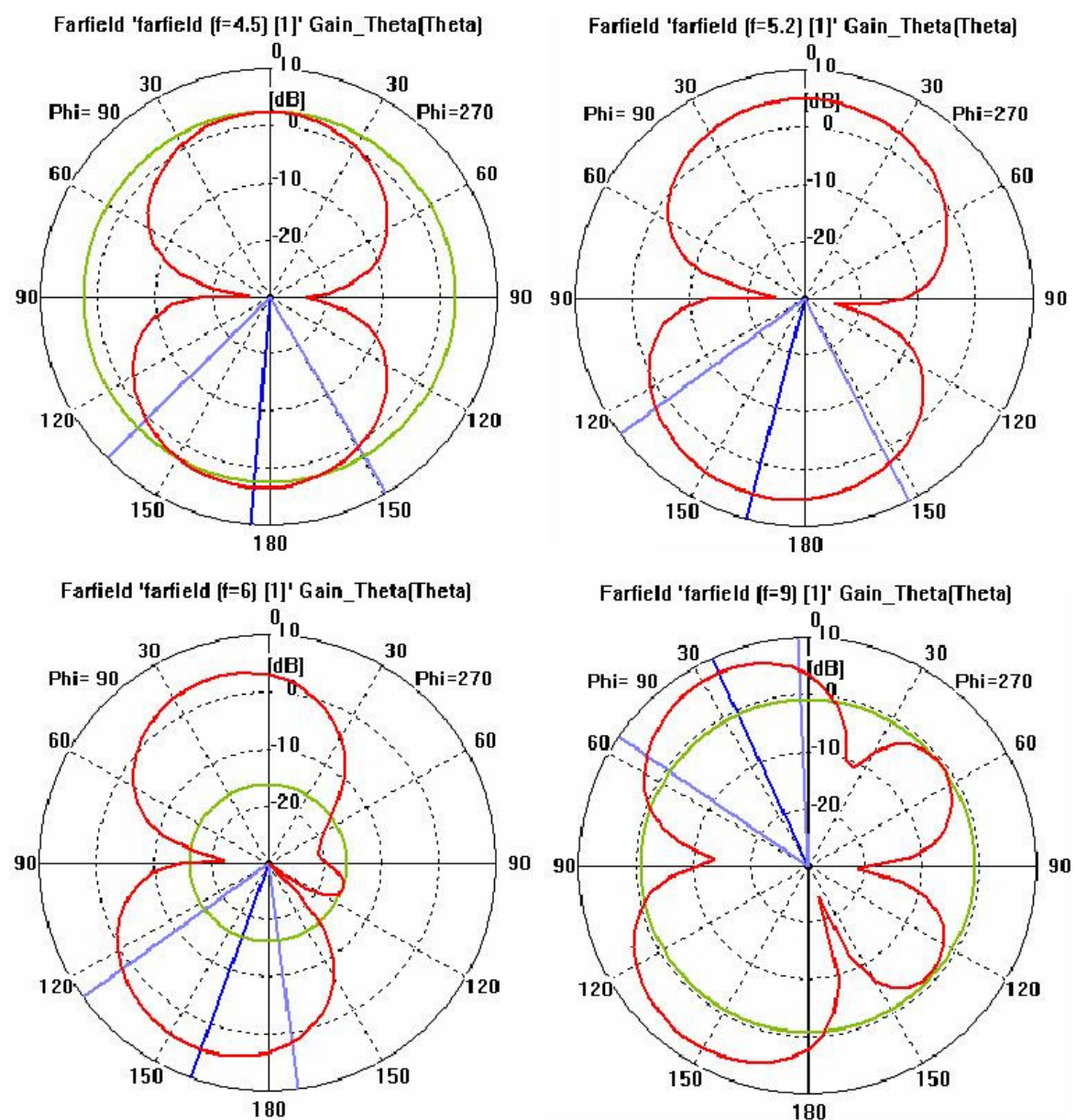


Figura 20. Diagramas de radiación en el plano E en las frecuencias 4.5, 5.2, 6 y 9 GHz respectivamente



En este caso, en la Fig. 20 se muestran también diagramas de radiación similares, con lo la antena tendría estabilidad en la radiación. En frecuencias altas, tanto en el plano H como en el plano E, el diagrama de radiación se hace más inestable con respecto a los de frecuencias más bajas.

## 2.4 Distribución de corriente

En este apartado se va a presentar la distribución de corriente de la antenna. Dicha distribución tiene utilidad para interpretar el funcionamiento de la antenna. En este sentido podemos ahora considerar la antenna como un elemento de un circuito, que tiene una distribución de corrientes sobre sí misma. Esta distribución dependerá de muchos factores, por ejemplo de la longitud que tenga la antenna y de su punto de alimentación.

El objetivo de este apartado es visualizar el efecto que tiene la incorporación del strip en la antenna. Por ello, a continuación se muestran tres casos para varias frecuencias, de tal modo que se observa la diferencia de densidad de corriente entre ellos.

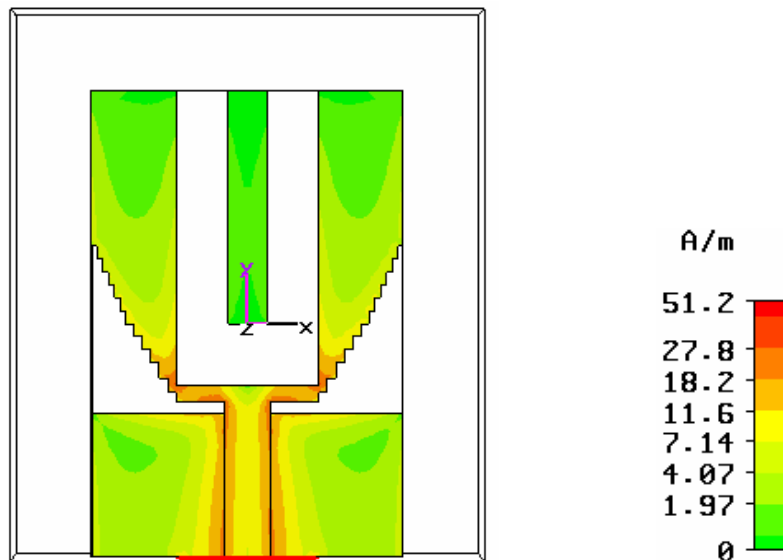


Figura 21. Distribución de corriente de la antenna en 3 GHz

La Fig. 21 muestra la densidad de corriente que recorre la antenna en 3 GHz, señalando con un código de colores la intensidad.

La siguiente imagen, presentada en la Fig. 22, es la relacionada con la frecuencia a partir de la cual se produce el rechazo, es decir, la correspondiente a la frecuencia de 5.2 GHz. Se observan claramente las diferencias en la corriente, principalmente en la parte superior de la antenna y en el strip. En esta nueva frecuencia se observa una mayor intensidad en la proximidad del elemento resonante, lo que puede relacionarse con el efecto que produce el rechazo en la banda.

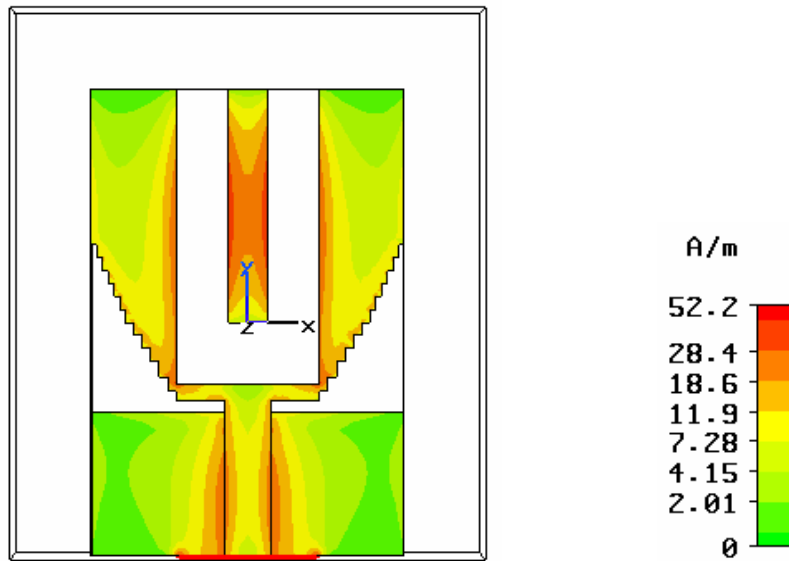


Figura 22. Distribución de corriente de la antena en 5.2 GHz

La Fig. 23 muestra la densidad de corriente en 6.5 GHz. Comparándola con las gráficas anteriores, se observa de nuevo que la región que presenta mayor diferencia de densidad es la parte superior de la antena. Por lo tanto, el hecho de que esta frecuencia no pertenezca a las frecuencias de la banda rechazada, hace que la distribución de corriente sea más suave cerca del strip.

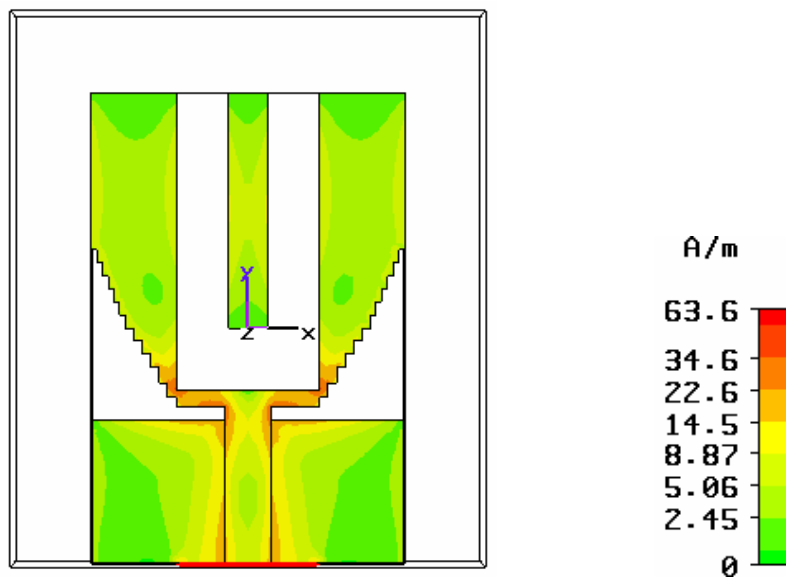


Figura 23. Distribución de corriente de la antena en 6.5 GHz

# Capítulo 3

## Análisis del comportamiento de la antena frente a variaciones de sus parámetros

### 3.1 Introducción

Partiendo de la antena impresa que se ha presentado en el capítulo 2, se ha procedido a simular distintas modificaciones de ésta. Los resultados obtenidos de este proceso se muestran en este capítulo. Los parámetros que se modificarán son la longitud y anchura del strip y su posible desplazamiento dentro de la estructura radiante, tanto sobre el eje  $x$  como sobre el eje  $y$ .

En cada uno de los siguientes apartados se estudiará el comportamiento de cada antena modificada, mostrando entre otros el coeficiente de reflexión, la ROE y la ganancia obtenidas. También se procederá a la evaluación del efecto de los cambios con respecto a la antena inicial.

## 3.2 Modificaciones del plano de masa

Para comenzar este apartado se ha realizado una modificación física de la antena que afecta únicamente al plano de masa. En parte, fue debido al interés en esta parte del proyecto por la que se eligió la antena actual y no las otras posibles opciones. A continuación se va a mostrar el efecto que produce el notch o ranura sobre la antena mediante sus simulaciones.

Por lo tanto, la modificación de este apartado consiste en la eliminación de la ranura o notch que poseía el plano trasero, pasando éste de tener la forma de la figura izquierda a tener la de la figura de la derecha.

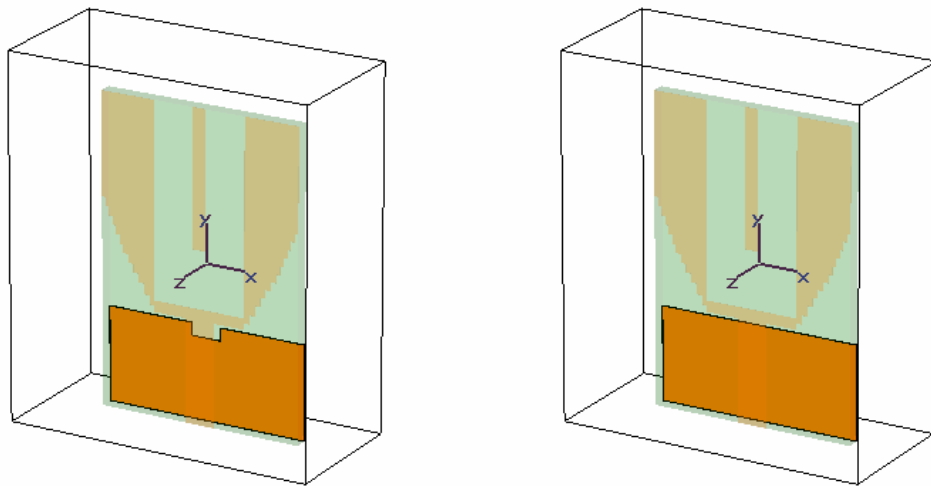


Figura 24. Visualización del plano de masa de la antena con notch y sin notch respectivamente

Tras las simulaciones realizadas, comenzamos a observar cómo ha afectado esta modificación sobre el plano de masa.

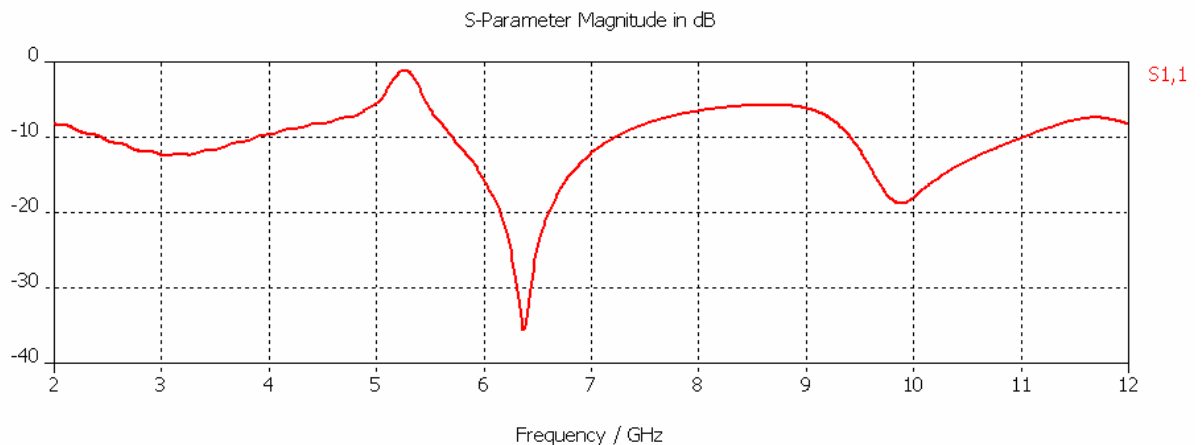


Figura 25. Parámetros S de la antena sin notch

En primer lugar, en la gráfica de los parámetros S de la Fig. 25, se observa un máximo cerca de 5.4 GHz. Éste tiene un coeficiente de reflexión elevado, de aproximadamente -1 dB. A partir de éste se produce una caída bastante pronunciada.

También se observa en la figura una desadaptación a tener en cuenta en el rango de frecuencias entre 7.5 GHz y 9.5 GHz. El coeficiente de reflexión que se alcanza en esta zona sobrepasa claramente los -10 dB. En la ROE también se apreciará este hecho.

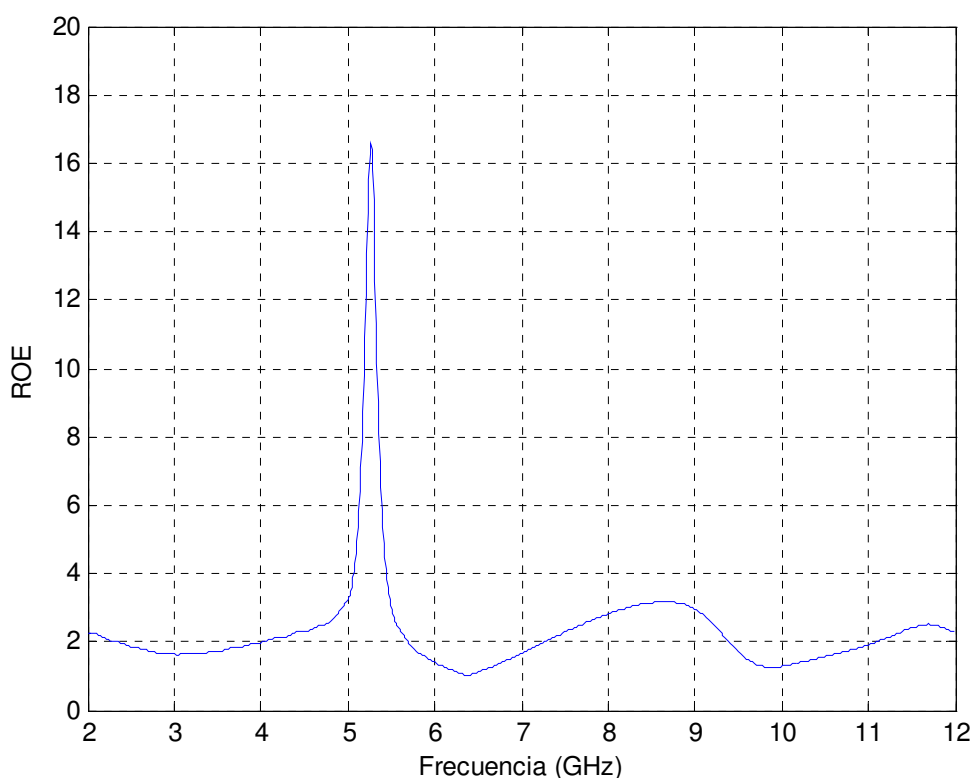


Figura 26. ROE de la antena sin notch

Al calcular la gráfica de la ROE, y dada la relación existente entre ROE y coeficiente de reflexión, se observa claramente dónde se encuentra la banda rechazada de frecuencias (alrededor de la frecuencia donde en la gráfica anterior se encontraba el máximo principal, es decir, cerca de 5.4 GHz).

En el caso de la antena inicial, también se encontraba la banda rechazada aproximadamente en la misma zona, por lo que en ese aspecto no se ha producido ningún cambio.

Observando las gráficas de la ROE de esta antena y de la antena de partida, se aprecia que con la eliminación del notch la ROE alcanza valores más altos en todas sus frecuencias, por lo tanto se produce un mayor rechazo. Este punto sería una gran ventaja si sólo se produjese alrededor de la banda rechazada, pero también produce un efecto en el resto de frecuencias, llegando la ROE en algunas zonas a estar alrededor de 3 o incluso por encima, lo que significa una mayor desadaptación.

Se puede afirmar que el notch del plano de masa se coloca para conseguir con ello una mejor adaptación general de la antena. Aunque con su presencia las frecuencias donde se encuentra la banda rechazada tengan una menor ROE, este hecho queda claramente compensado con su comportamiento en el resto de frecuencias.

Veamos ahora el comportamiento de la ganancia de la antena que se incluye en al Fig. 27.

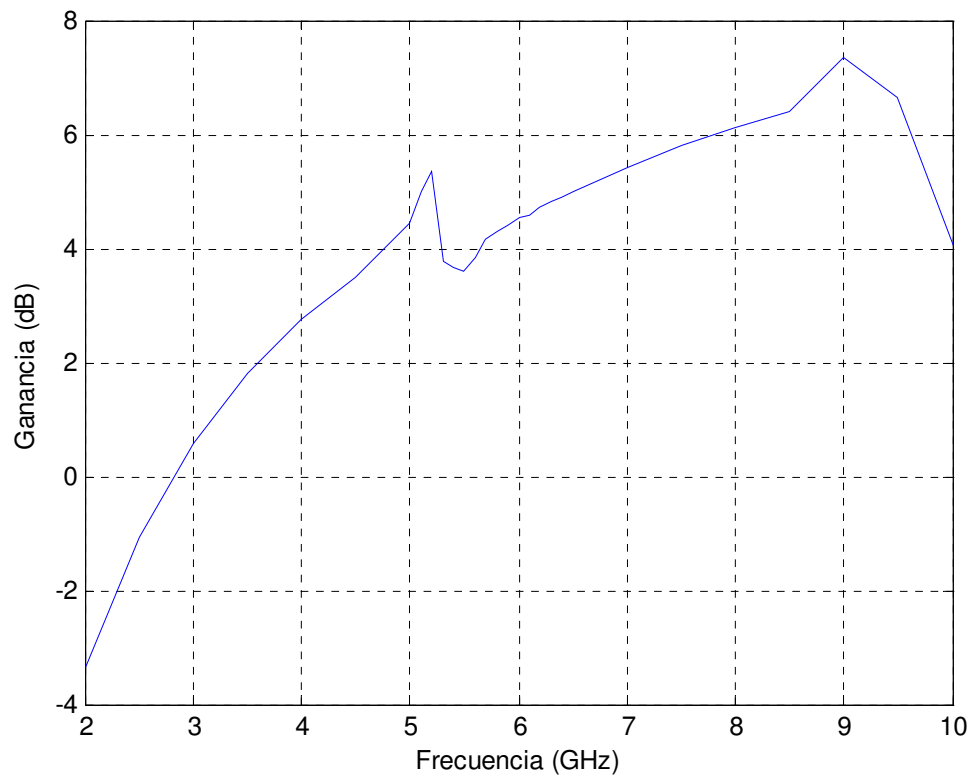


Figura 27. Ganancia de la antena sin notch

La ganancia sigue el comportamiento esperado, creciendo hasta llegar aproximadamente a la zona del rechazo frecuencial, donde disminuye drásticamente. Tras este punto vuelve a tener un incremento a través de las diferentes frecuencias alrededor de 1 dB/GHz.

### 3.3 Modificaciones de la anchura del strip

#### Antena con strip más ancho

En esta nueva versión se ha modificado el strip, convirtiéndose éste en el elemento que se cambiará en la mayoría de los sucesivos casos. Así, se aumenta la anchura de dicho strip a 6 mm con el fin de observar las diferencias con respecto a la antena de la cual se ha partido, analizando igualmente su coeficiente de reflexión, ROE y ganancia.

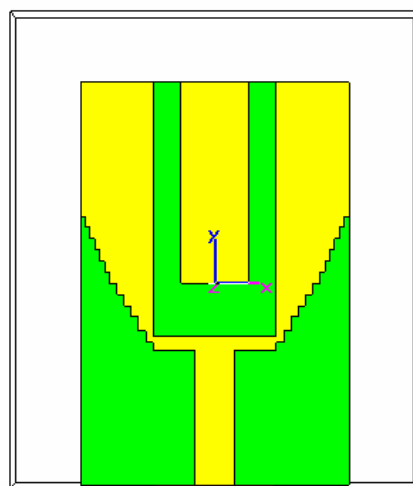


Figura 28. Antena con el strip más ancho

Se procede del mismo modo con la herramienta *CST Studio Suite 2006* y se calculan las características mencionadas.

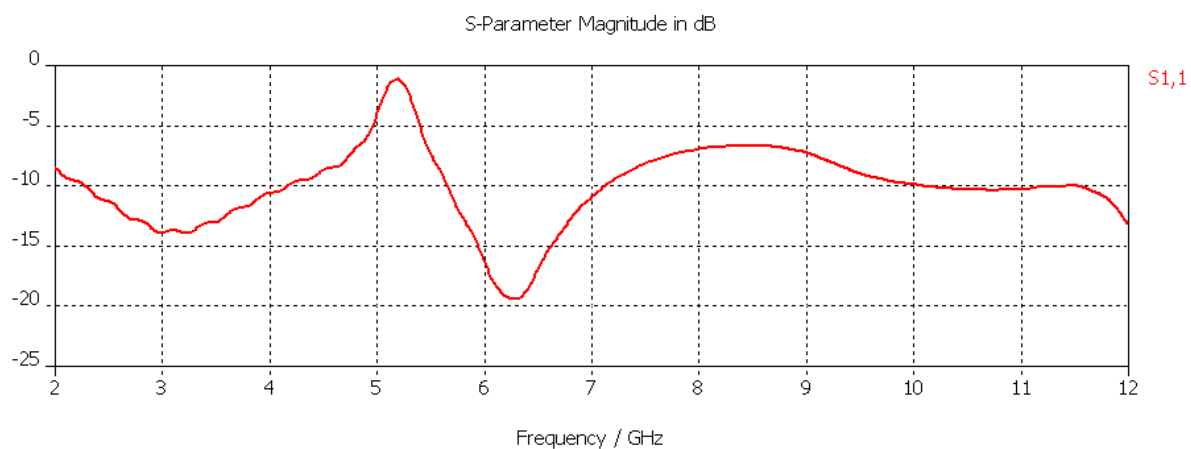


Figura 29. Parámetros S de la antena con el strip más ancho



En primer lugar nos hemos centrado en los parámetros S que, a la vista de la Fig. 29, son muy similares a los calculados en el apartado anterior. El máximo de la gráfica se encuentra en torno a -1.5 dB en la frecuencia de 5.3 GHz aproximadamente. Por lo tanto, se deduce que la anchura del strip no va a tener grandes consecuencias en cuanto a la elección de las bandas frecuenciales rechazadas. Más adelante se estudiará la antenna con el strip más estrecho, lo que nos permitirá seguir analizando este aspecto.

En la siguiente gráfica (Fig. 30) se muestra la ROE de la antenna. Como los parámetros S son muy similares a los anteriores, se puede decir que esta gráfica también será análoga a la de la antenna original ya que la ROE depende del coeficiente de reflexión del mismo modo.

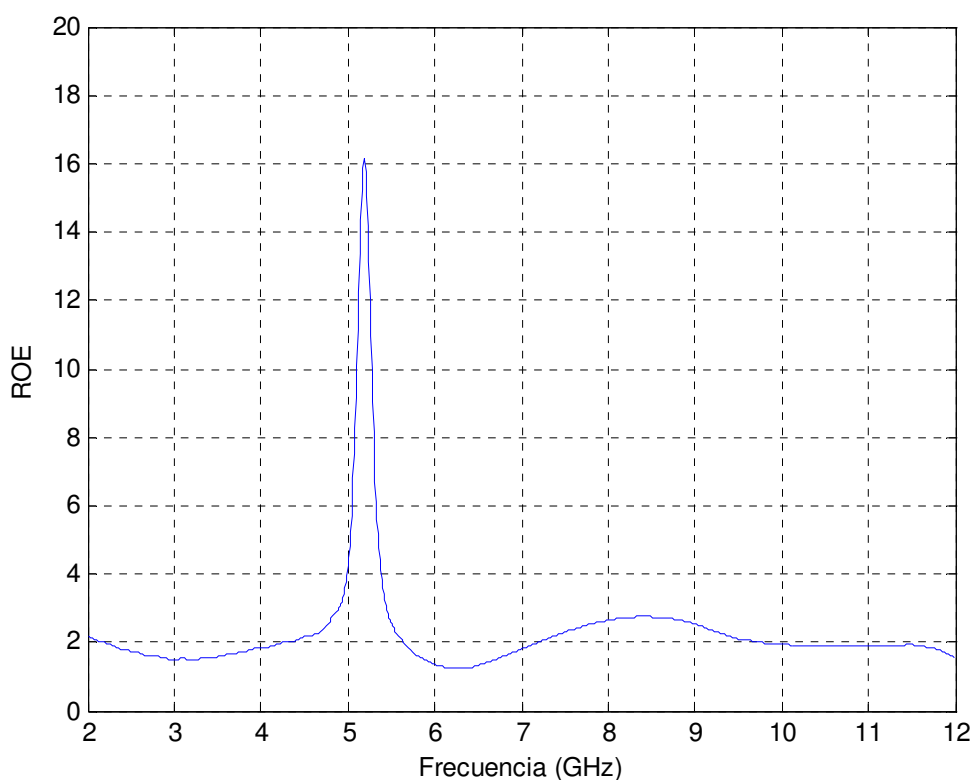


Figura 30. ROE de la antenna con el strip más ancho

La principal diferencia es que en la frecuencia de la banda rechazada, la ROE es aproximadamente una unidad mayor. Esto se debe a que una pequeña variación de los parámetros S en decibelios (como se muestran en las figuras) conlleva una mayor diferencia en unidades naturales.

En cuanto a la ganancia de la antenna (mostrada en la Fig. 31), se ve cómo va creciendo hasta las frecuencias próximas a 5.1 GHz, en las que se produce una rápida caída con una ligera oscilación. En esta zona interesa tener menos ganancia porque es la zona de rechazo y en la que no interesa transmitir para evitar interferencias. Pasada esta zona, la ganancia vuelve a su tendencia de crecimiento, teniendo su máximo (alrededor de 7.3 dB) en 9 GHz.

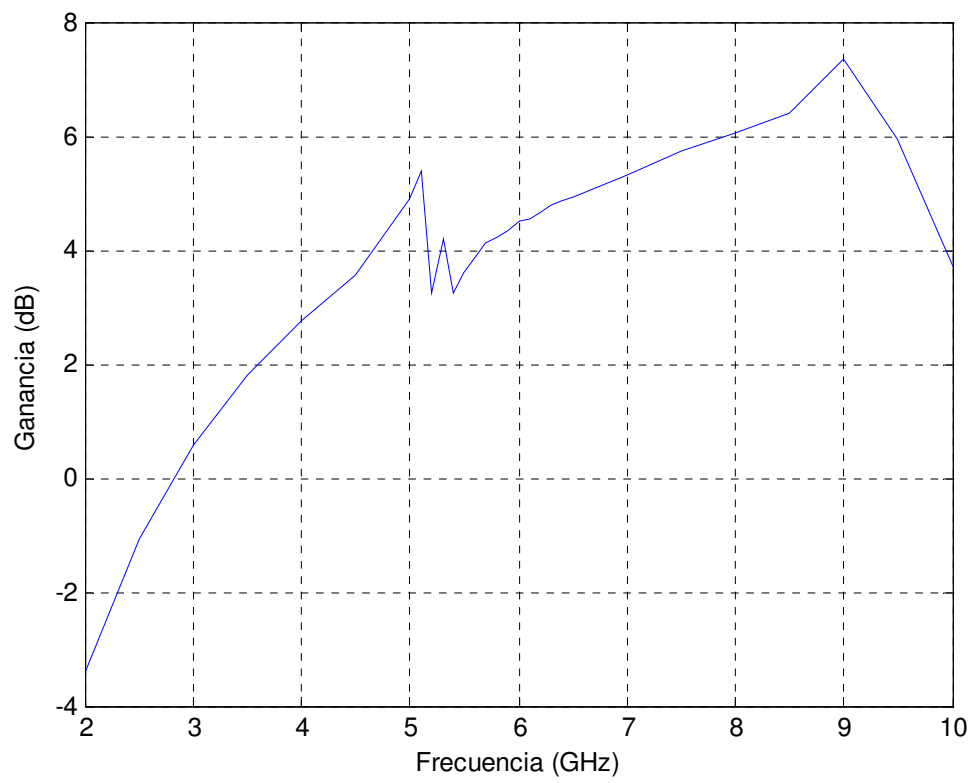


Figura 31. Ganancia de la antena con el strip más ancho

## Antena con strip más estrecho

Modificando la anchura del strip, igual que en el caso anterior, se obtiene esta nueva antena que se muestra en la Fig. 32. En este caso se ha restado 1.4 mm a la anchura original del strip. El resto de los parámetros permanecen inalterados.

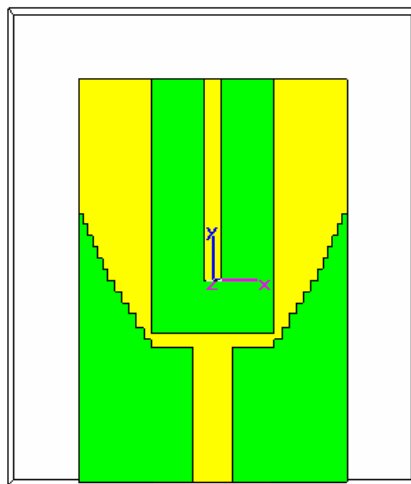


Figura 32. Antena con el strip más estrecho

Se procede de manera similar a los casos previos y se obtienen los resultados simulados que muestran las figuras siguientes.

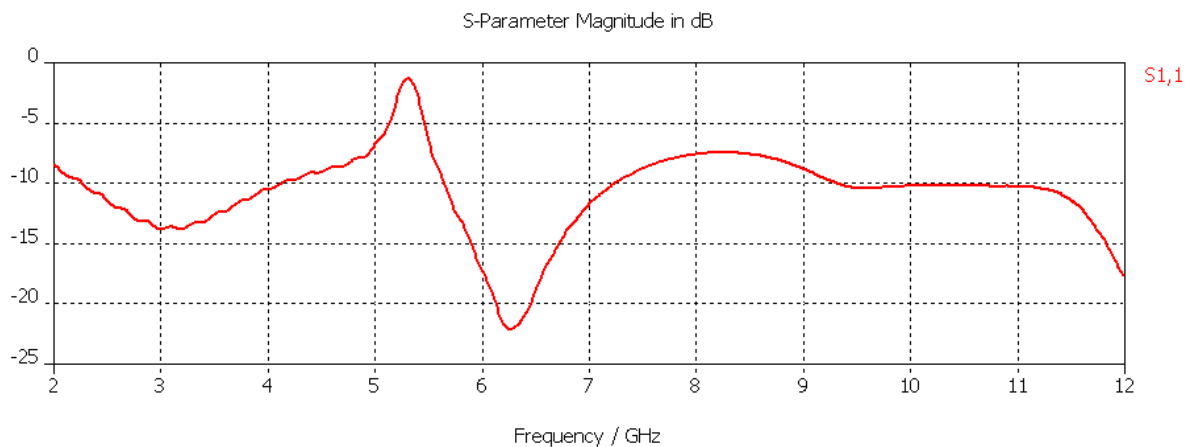


Figura 33. Parámetros S de la antena con el strip más estrecho

Sobre la adaptación mostrada en la Fig. 33, podemos decir que el coeficiente de reflexión es muy similar a los alcanzados en otros apartados, aunque un mínimo bastante más bajo y marcado. Por tanto, la disminución en la anchura de la tira tampoco hace que la banda rechazada se desplace, con lo que se concluye que la anchura del strip no influye en la posición de la banda rechazada.

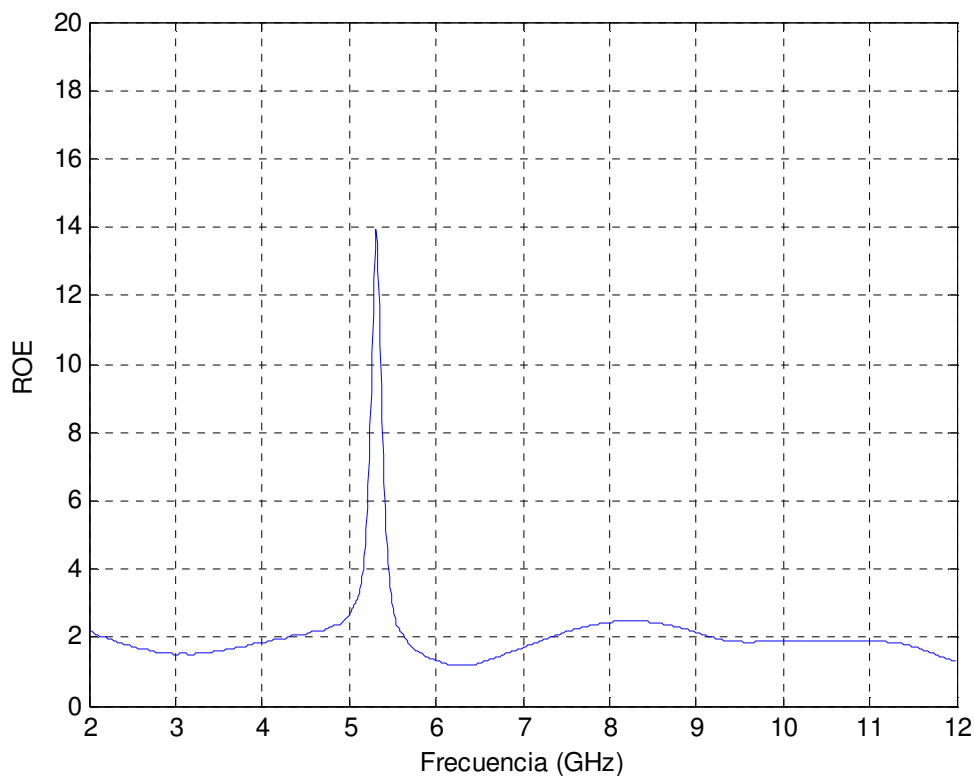


Figura 34. ROE de la antena con el strip más estrecho

En el caso de la ROE mostrada en la Fig. 34, en la zona de la banda rechazada se obtienen cerca de dos unidades menos que para el caso anterior. Estos niveles son muy parecidos a los obtenidos con la antena inicial. Su forma y la posición de sus máximos hacen que se consiga una ROE casi idéntica en todos los casos observados hasta ahora.

Con la ganancia ocurre exactamente igual a los otros casos: va aumentando hasta la zona de rechazo de frecuencias, donde disminuye, para luego volver a aumentar gradualmente.

La siguiente gráfica muestra la comparación, en cuanto a ganancias, del caso anterior (donde el strip era más ancho) respecto al actual (más estrecho). La ganancia de la antena con el strip estrecho está representada en color azul, mientras que la correspondiente con el strip ancho es de color rojo.

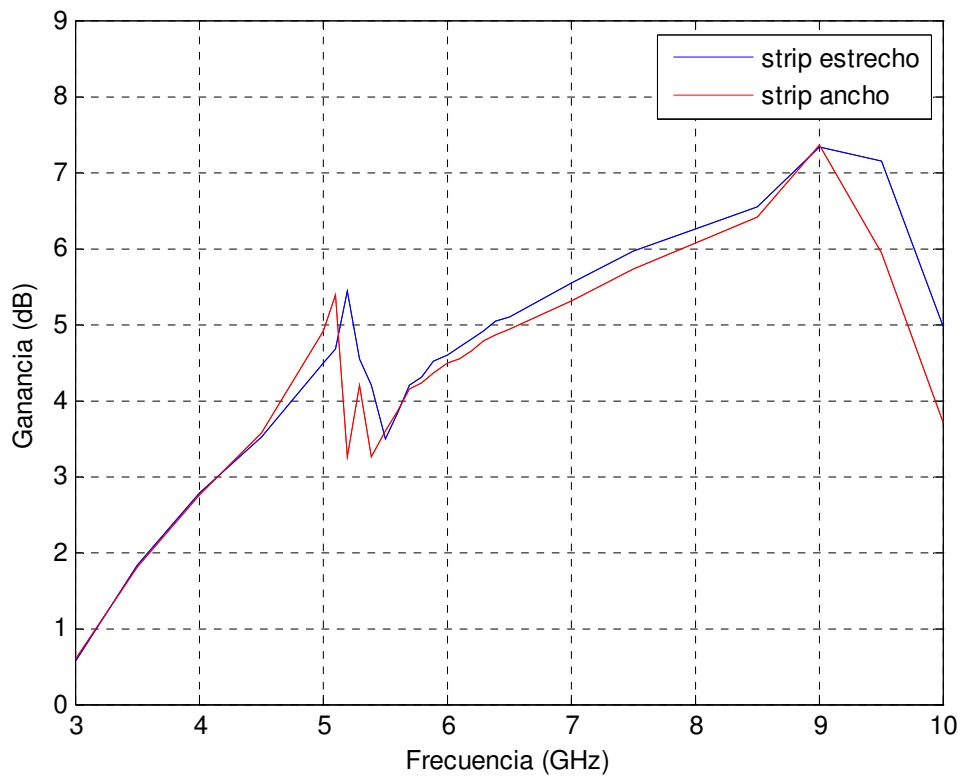


Figura 35. Comparativa de las ganancias de la antena con el strip más estrecho (azul) y de la antena con el strip más ancho (rojo)

A la vista de la figura, se observa que los trazos de ambas ganancias son similares en la mayoría de las frecuencias. Este hecho se produce debido a que los resultados tras cambiar el ancho de los strips son parecidos entre ellos y también semejantes a los que se obtuvieron en la simulación de la antena inicial en el capítulo 2.

### 3.4 Modificaciones de la longitud del strip

#### Antena con strip más largo

Tras haber simulado la antena cambiando la anchura del strip, para este apartado se modifica la antena atendiendo a la longitud del mismo. De esta manera, se alarga el strip para volver a hacer los cálculos oportunos viendo cómo se diferencia esta antena de las demás. El strip pasa de tener 18 mm de largo a tener 20.6 mm.

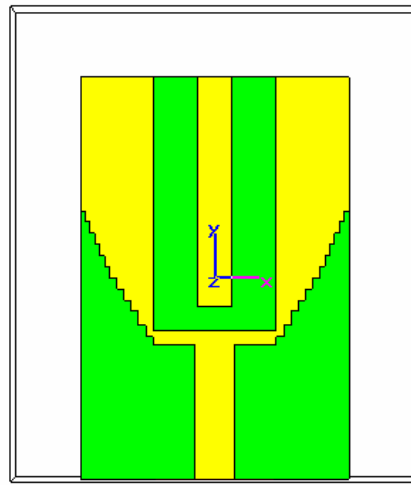


Figura 36. Antena con el strip más largo

Al obtener el coeficiente de reflexión de la Fig. 37, se aprecia que la curva presenta más cambios. El pico máximo alcanza aproximadamente los -1 dB y el mínimo absoluto es de unos -22 dB, con lo que hay una caída considerable en un ancho de 2 GHz (desde el máximo hasta el mínimo).

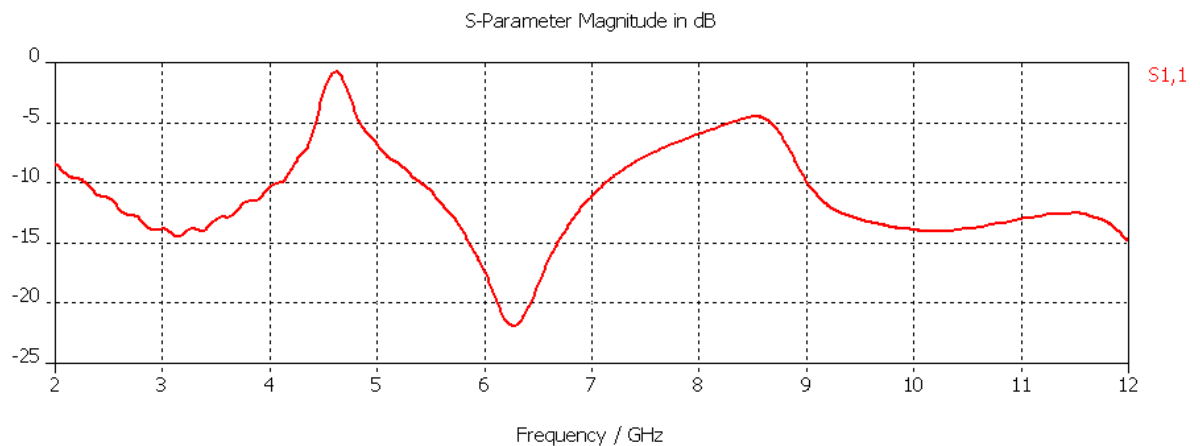


Figura 37. Parámetros S de la antena con el strip más largo

A partir de estos parámetros S se calcula la ROE que, tal y como se muestra en la Fig. 38, tiene un máximo pronunciado localizado en una frecuencia aproximada de 4.5 GHz. El valor de la ROE en este máximo es cercano a 25, muy superior a los valores alcanzados anteriormente, tanto en la antena de partida como en las distintas modificaciones sobre ella.

También se deduce que al lograr hacer el strip más largo, la banda rechazada se desplaza hacia frecuencias inferiores. Para esta longitud la banda rechazada está en torno a 4.5 GHz, por lo que se ha producido aproximadamente un desplazamiento de 800 MHz con respecto a la de la antena de partida.

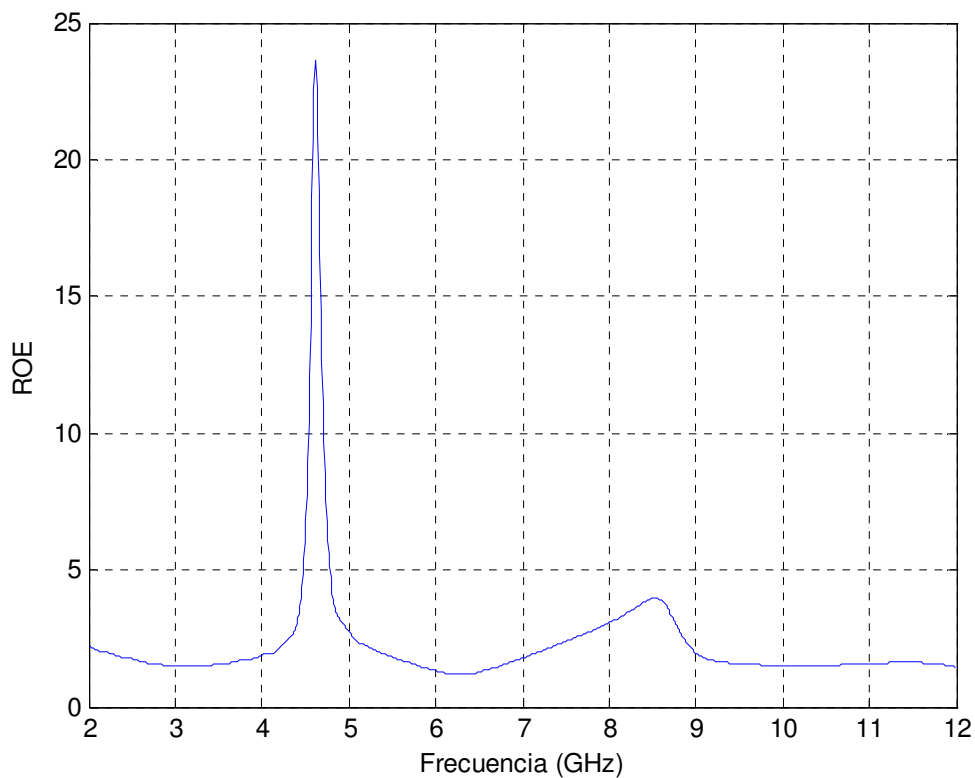


Figura 38. ROE de la antena con el strip más largo

En cuanto a la ganancia (ver Fig. 39), va aumentando progresivamente hasta las frecuencias de la banda rechazada, donde disminuye aproximadamente 1 dB, para después ir aumentando a medida que se incrementa los valores de la frecuencia. En esta sección, la disminución de la ganancia es inferior a los casos presentados previamente.

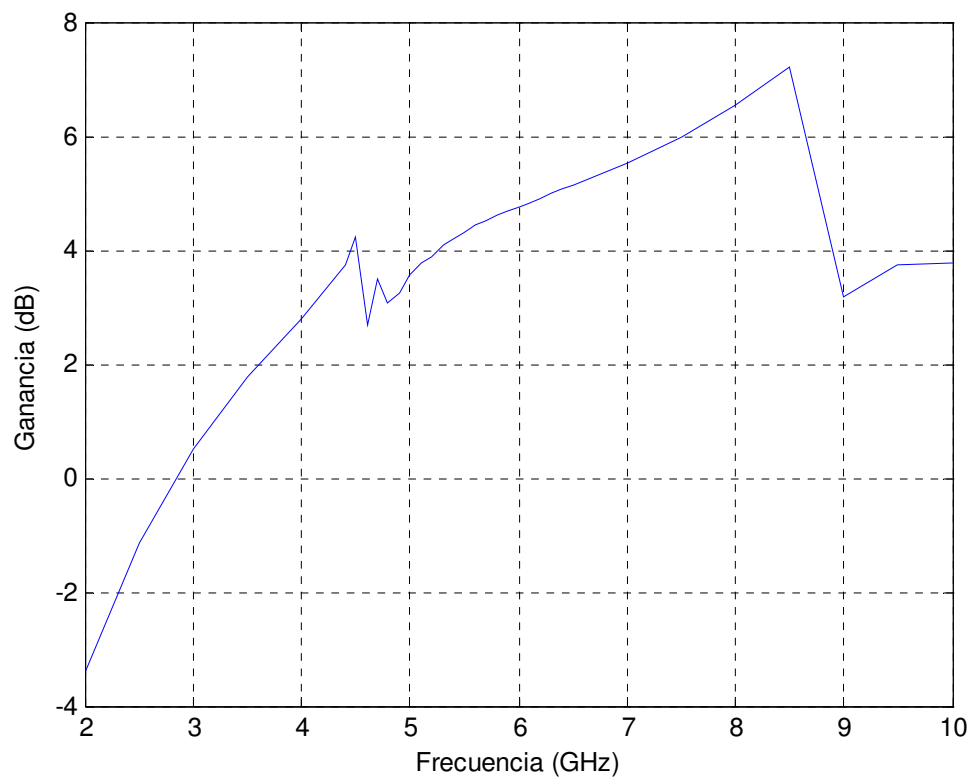


Figura 39. Ganancia de la antena con el strip más largo



## Antena con strip más corto

Al contrario que en el caso anterior, en este apartado se le resta longitud del strip, pasando a tener ahora 12.2 mm y quedando la antena como muestra la Fig. 40.

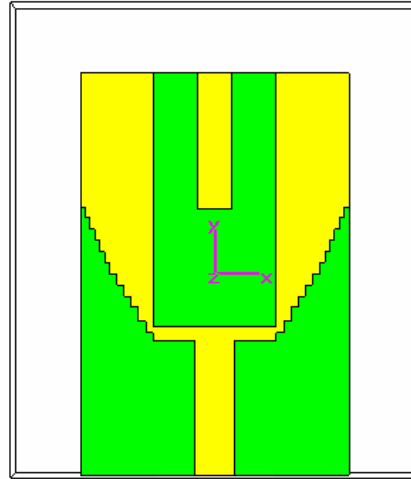


Figura 40. Antena con el strip más corto

En la Fig. 41 se presenta la gráfica del coeficiente de reflexión. Su máximo se encuentra localizado en la frecuencia de 7.3 GHz aproximadamente aunque no se trata de un máximo muy pronunciado. El valor que alcanza es inferior a -5 dB, por lo que se puede adelantar que la banda rechazada no será muy efectiva.

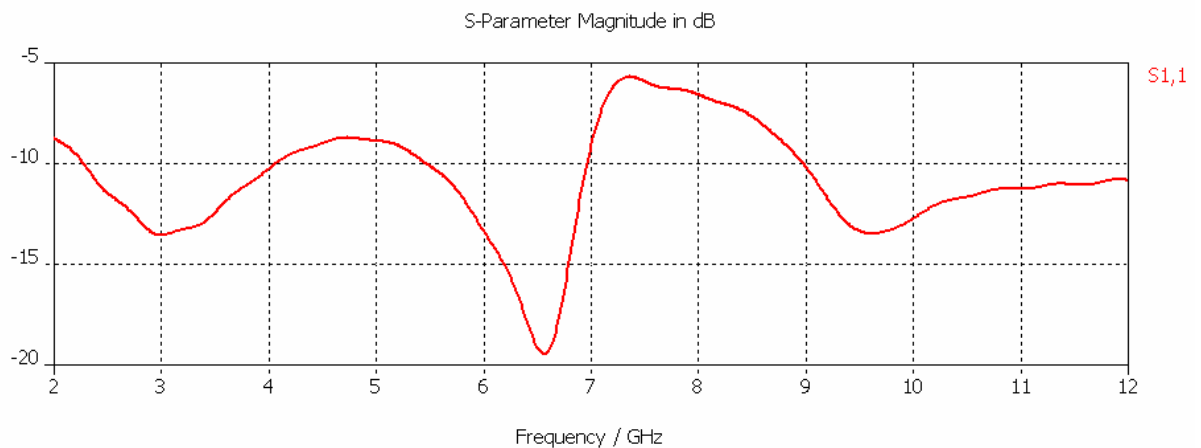


Figura 41. Parámetros S de la antena con el strip más corto

La ROE que se calculará tampoco será alta, haciendo así que el rechazo en 7.3 GHz y frecuencias adyacentes sea muy pobre.

Observando la gráfica de la ROE de la Fig. 42, se aprecia que donde más pérdidas se producen es alrededor de la frecuencia de 7.3 GHz. Respecto a los casos anteriores se trata de una gran diferencia ya que la banda de frecuencias rechazadas se habría desplazado aproximadamente 2.5 GHz hacia frecuencias superiores. Como ya se había adelantado, la máxima ROE no es muy elevada por lo que esta antena no rechazará la potencia de la misma manera que las otras antenas estudiadas.

Se podría decir, que acortando la longitud del strip, el objetivo perseguido en este diseño no se alcanzaría, ya que no se rechaza ninguna banda de frecuencias de manera eficiente. Por este motivo no sería efectivo para evitar interferencias.

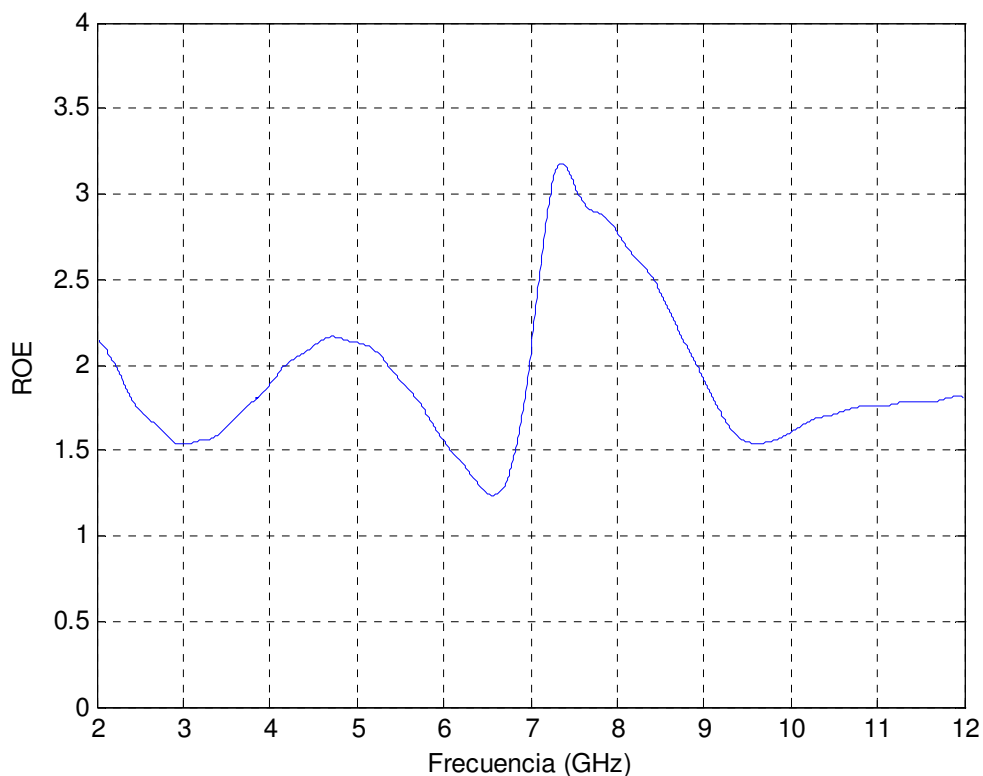


Figura 42. ROE de la antena con el strip más corto

Tanto de este apartado como del anterior, en los que se estudia el efecto de la longitud del strip, se deduce que este parámetro es fundamental para rechazar o no la banda de frecuencias y para desplazarla, siempre dentro de unos límites.

De esta forma, a medida que la longitud del strip aumenta, la banda rechazada se va desplazando hacia frecuencias menores. Igualmente, si la longitud del strip se hace más corta, la banda rechazada se trasladará hacia frecuencias más altas aunque con un coeficiente de reflexión inferior, con lo que esta banda rechazará con una efectividad cada vez menor.

Por último, se calcula la ganancia de la antena, mostrando una figura comparativa (Fig. 43) entre las ganancias de este caso y del anterior. En ésta también se puede apreciar que la localización de las bandas rechazadas ha cambiado con la longitud de la tira metálica que incorpora la antena.

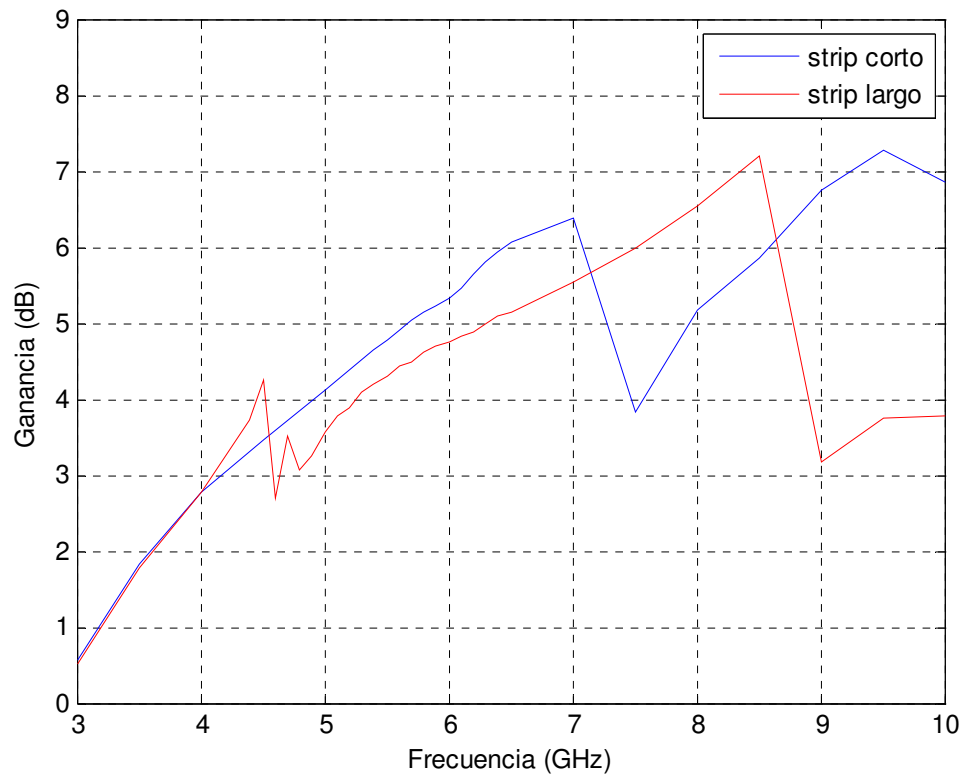


Figura 43. Comparativa de las ganancias de la antena con el strip más largo (rojo) y de la antena con el strip más corto (azul)

### 3.5 Modificaciones de la posición del strip

#### Antena con strip desplazado en el eje de las x

Tras haber presentado la antena de partida y las antenas tras modificar las dimensiones del strip (tanto el ancho como el largo), ahora el estudio se centra en el desplazamiento del mismo sobre la estructura de la antenna. En el caso que se muestra en la Fig. 44, la tira metálica es trasladada 2 mm hacia valores positivos del eje x.

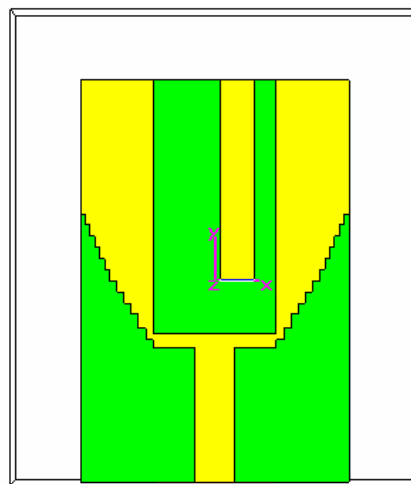


Figura 44. Antena con el strip desplazado sobre el eje x

Al simular esta antena se obtiene la gráfica del coeficiente de reflexión (Fig. 45), donde se aprecia la existencia de un máximo ubicado aproximadamente en 5.3 GHz. Éste alcanza un nivel de -2 dB de coeficiente de reflexión.

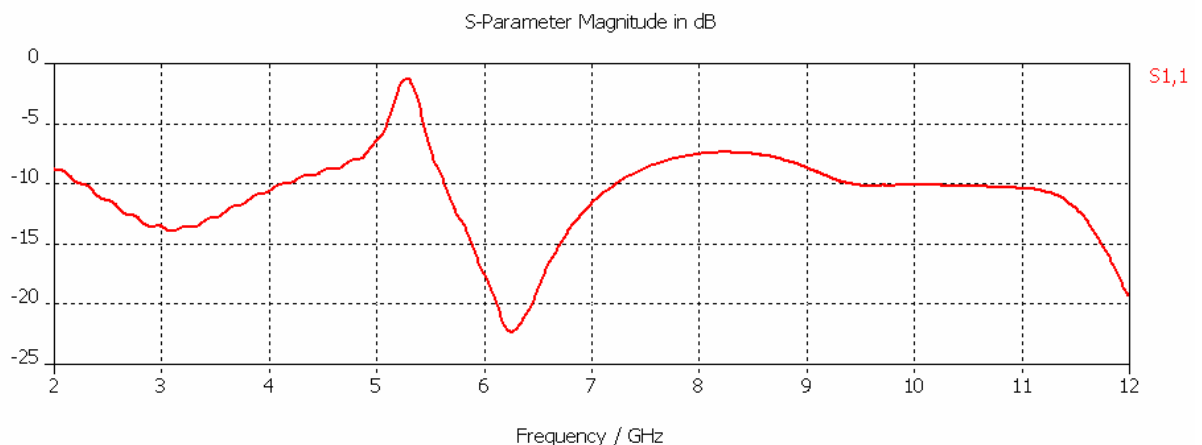


Figura 45. Parámetros S de la antena con el strip desplazado sobre el eje x

Este hecho quiere decir que será alrededor de esa frecuencia donde se encuentre la banda rechazada. A continuación, con la gráfica de la ROE mostrada en la Fig. 46 se aprecia claramente.

La ROE tiene un pico muy estrecho en la frecuencia de 5.3 GHz que alcanza un valor ligeramente superior a 14. Por lo tanto, rechazará correctamente las frecuencias adyacentes a ésta, ya que se trata de una ROE suficientemente alta para ello.

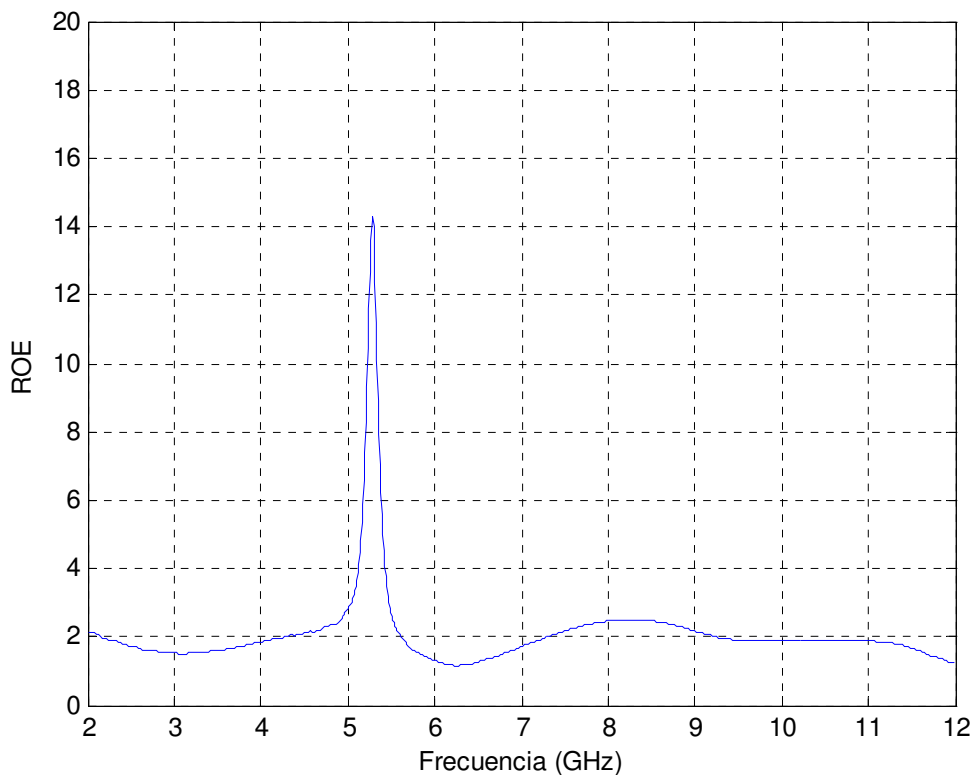


Figura 46. ROE de la antena con el strip desplazado sobre el eje x

En la gráfica de la ganancia (Fig. 47) ocurre lo que se esperaba. Se observa que esta ganancia crece hasta las frecuencias rechazadas donde se decrementa 2 dB. Pasadas estas frecuencias de rechazo continúa con su crecimiento progresivamente.

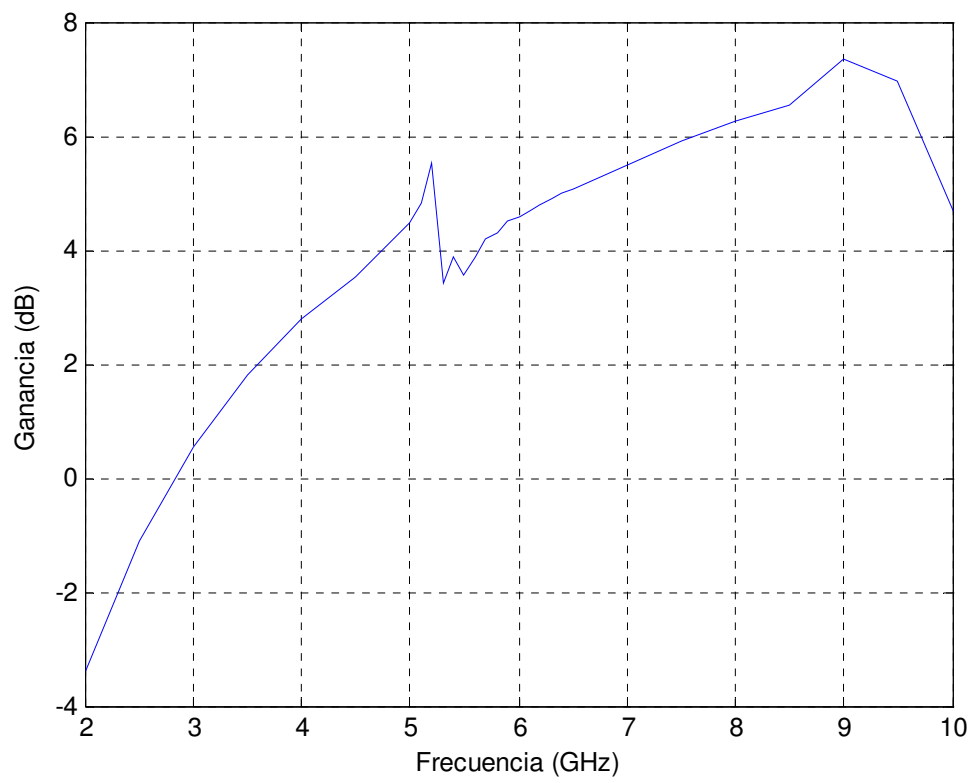


Figura 47. Ganancia de la antena con el strip desplazado sobre el eje x

## Antena con strip desplazado en el eje de las $y$

Tras estudiar el efecto que produce el desplazamiento del strip a lo largo del eje  $x$ , en este caso dicho strip se trasladará únicamente sobre el eje  $y$ . La antena resultante es la que se muestra en la Fig. 48, consecuencia de haber desplazado el strip 2.5 mm hacia valores decrecientes del eje vertical.

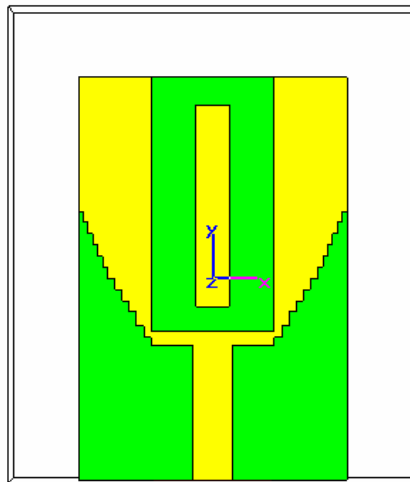


Figura 48. Antena con el strip desplazado sobre el eje  $y$

Los parámetros  $S$  de la Fig. 49 muestran que su máximo está en 5 GHz, es decir, alrededor de esta frecuencia se localizará la banda rechazada. En este máximo el eje vertical alcanza un valor cercano a -1 dB. Se trata de un coeficiente de reflexión elevado, con lo que se logrará un rechazo de frecuencias muy efectivo. Se observa también que la banda rechazada se ha desplazado 300 MHz hacia frecuencias inferiores respecto a la antena inicial.

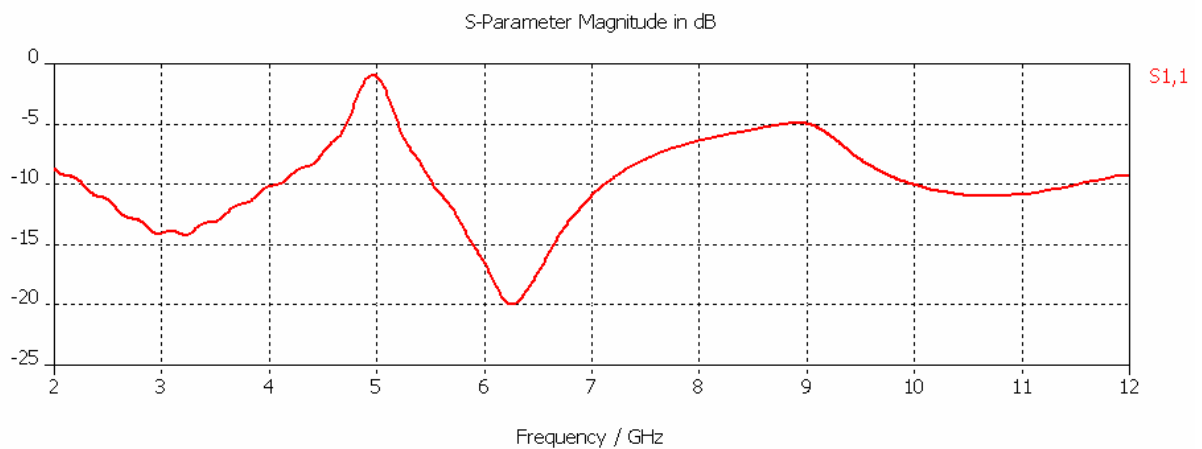


Figura 49. Parámetros  $S$  de la antena con el strip desplazado sobre el eje  $y$

En Fig. 50 se observa cuál es el comportamiento de la ROE asociada a esta antena. En 5 GHz, frecuencia donde se encuentra su máximo, la ROE es muy alta, próxima a 20. De esta manera, se rechaza muy bien la potencia transmitida en esta banda de frecuencias.

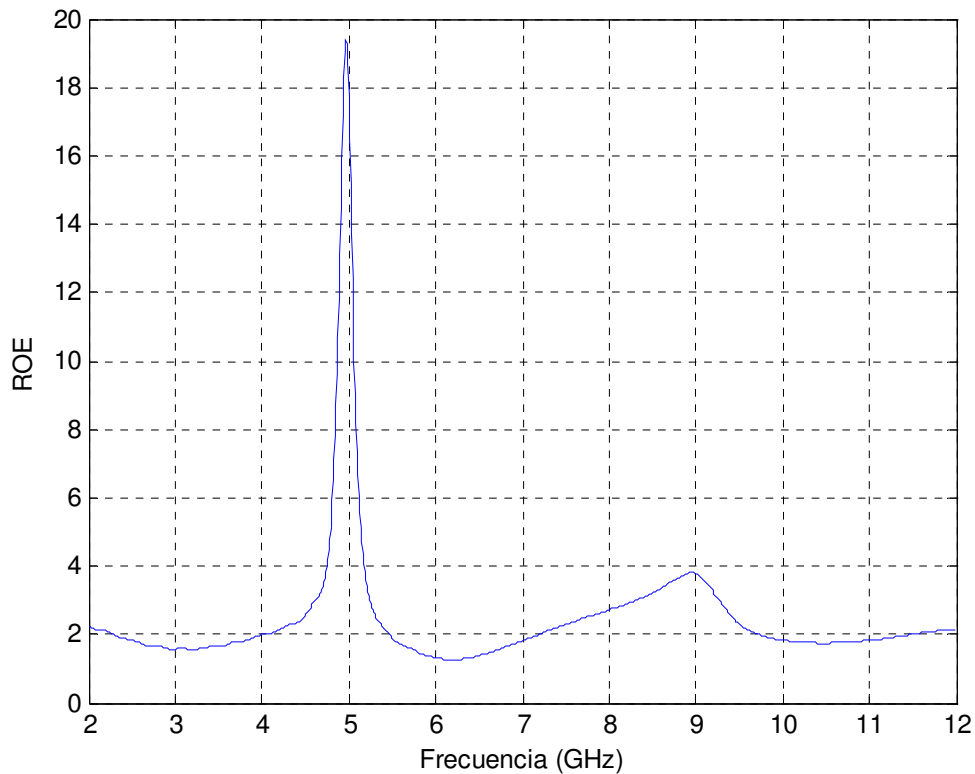


Figura 50. ROE de la antena con el strip desplazado sobre el eje y

Respecto a la ganancia de la antena, ésta se va incrementando hasta llegar a las frecuencias rechazadas, donde disminuye. En frecuencias superiores continúa aumentando progresivamente. La ganancia máxima de la antena es ligeramente superior a 7 dB.

En la Fig. 51 se aprecia una comparativa entre la ganancia de la antena con el strip desplazado sobre el eje x y la ganancia de la antena con el strip desplazado sobre el eje y. En esta gráfica también queda reflejado el desplazamiento de la banda rechazada que ha tenido lugar en el segundo caso.



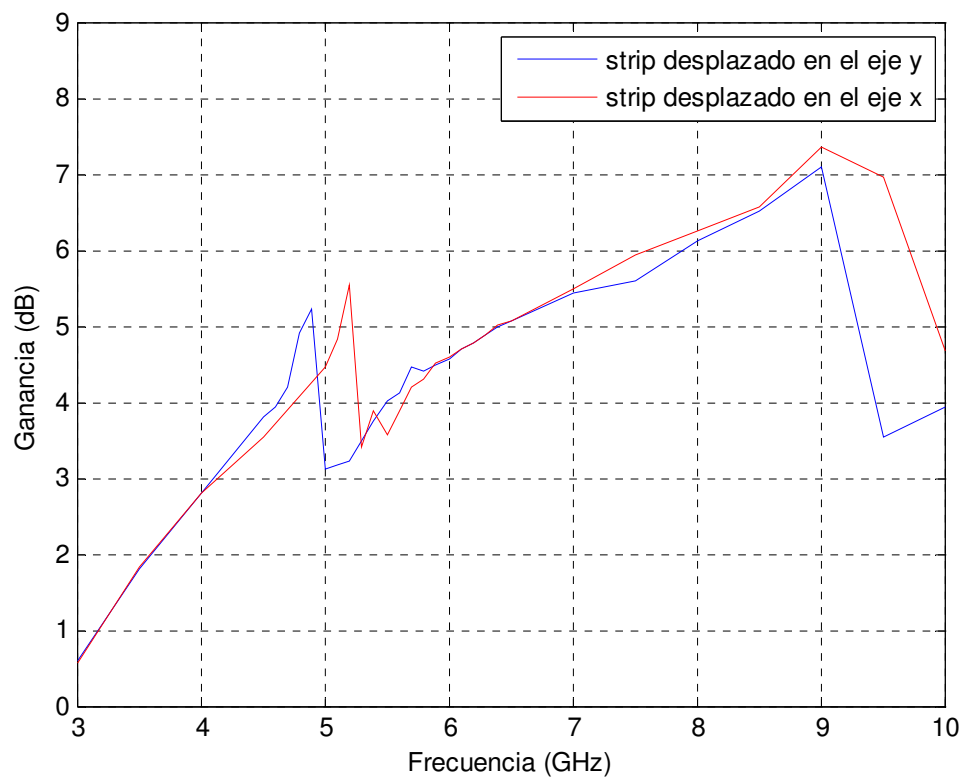


Figura 51. Comparativa de las ganancias de la antena con el strip desplazado sobre el eje y (azul) y de la antena con el strip desplazado sobre el eje x (rojo)

### 3.6 Discusión de los resultados

Después de este estudio en simulación que ha tenido en cuenta las modificaciones de varios parámetros de la antena del artículo, se obtienen algunas conclusiones que resumo a continuación.

La primera conclusión que se extrae tiene relación con la longitud de la tira metálica. La banda rechazada que se consigue va desplazándose hacia frecuencias superiores o inferiores a medida que se cambia la longitud del strip. El sentido del desplazamiento se orienta en función de si se alarga o se acorta dicha longitud.

Para sintetizar este efecto se ha elaborado una gráfica que muestra la relación entre la longitud del strip y la banda de frecuencias que logra rechazar la antena en cada caso. Se incluye esta información de la Fig. 52.

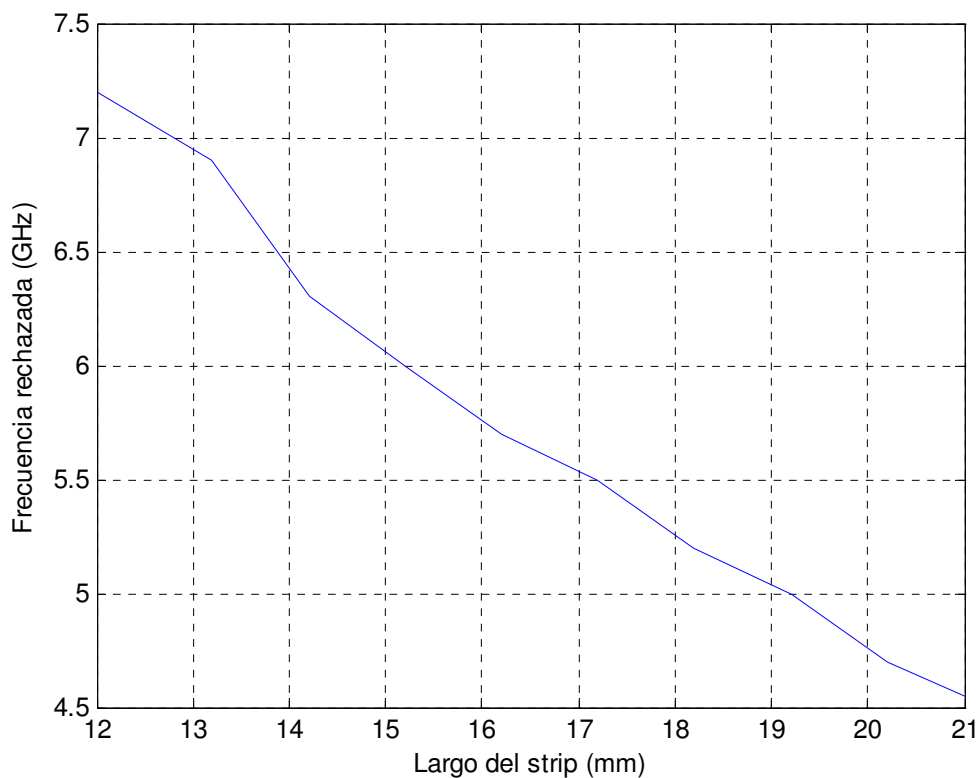


Figura 52. Relación entre largo del strip y las frecuencias rechazadas

A la vista de la figura, se comprueba que a medida que aumenta el largo del strip la banda rechazada se desplaza hacia frecuencias inferiores, teniendo el strip un límite de tamaño ya que se uniría con la estructura en forma de U. En este caso, el rechazo se lleva a cabo con una gran eficacia, logrando así su propósito.

Esto es coherente con el comportamiento de un resonador impreso, pues a medida que aumenta su longitud, disminuye su frecuencia de resonancia.

En el otro caso ocurre la situación opuesta, esto es, la banda rechazada se desplaza hacia frecuencias más altas, si bien hay que decir que no filtra con la misma eficacia en las distintas frecuencias. Es decir, cuanto más corto es el strip, más altas son las frecuencias rechazadas, pero la capacidad del rechazo cada vez será peor, llegando incluso a no provocar rechazo alguno.

Esta puntualización ya se dedujo en el [apartado 3.4](#) pero tras haber lanzado varias simulaciones para observar cómo afectan las distintas longitudes del strip, ha quedado corroborado. Los máximos de las diferentes gráficas de la ROE son muy desiguales, tanto por localización como por la ROE que alcanzan. Es por esta causa que la capacidad del rechazo frecuencial en cada uno de los casos difiera.

Con estas simulaciones también se ha llegado a la conclusión de que las frecuencias donde se produce un mejor rechazo son las que se encuentran alrededor de los 5 GHz. Para lograr el rechazo en estas frecuencias, la longitud que debe tener el strip es aproximadamente de 19 mm.

Teniendo en cuenta las demás modificaciones de la antena se llega a las siguientes conclusiones:

- La anchura del strip tiene un efecto casi nulo para la elección de la banda rechazada, desplazándose ésta apenas unos 100 MHz cuando se cambia el ancho. Este parámetro interviene al observar la adaptación de la antena, ya que para strips estrechos la adaptación es mejor, consiguiendo una ROE más baja en zonas donde no habría que experimentar rechazo alguno.
- El traslado de este strip hacia los lados (eje  $x$ ) tampoco afecta al desplazamiento de la banda rechazada. Sin embargo sí lo hace el desplazamiento del strip sobre el eje  $y$  (desplazamientos a lo largo del eje vertical). En la simulación de esta segunda opción, se consigue un rechazo desplazado aproximadamente 300 MHz hacia frecuencias menores con respecto a la antena de partida. Es de mencionar también que al desplazar el strip sobre el eje  $y$ , se produce una ligera desadaptación en frecuencias en torno a 9 GHz.

### 3.7 Modificaciones según el número de strips

Después del análisis de la antena tanto con el strip de tamaño y situación inicial como de ésta con cada una de sus modificaciones, en este apartado se introducen otros strips de características similares al primero. Este es un punto importante del proyecto ya que uno de nuestros objetivos es el de comprobar si con diferentes strips se podría lograr el rechazo de más de una banda de frecuencias, como se muestra en el artículo de partida.

Durante esta sección se aumentará el número de strips en la estructura de la antena a dos y a tres respectivamente. En cada uno de los casos se llevarán a cabo distintas simulaciones modificando, a su vez, las dimensiones de los strips o su colocación.

#### Antena con dos strips

En este apartado se introduce un nuevo strip en la antena, de manera que pueda actuar como una segunda estructura filtrante para distintas frecuencias. La geometría de la nueva antena propuesta está ilustrada en la Fig. 53.

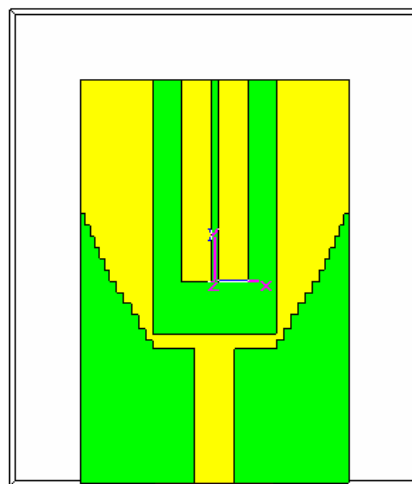


Figura 53. Configuración de la primera antena con dos strips

Tras la simulación de la antena con la herramienta CST Studio Suite 2006 y su posterior tratamiento con Matlab se obtiene la gráfica mostrada en la Fig. 54. En ella se observa la ROE de la antena con dos strips del mismo tamaño y que se encuentran centrados con respecto al eje  $x$ .

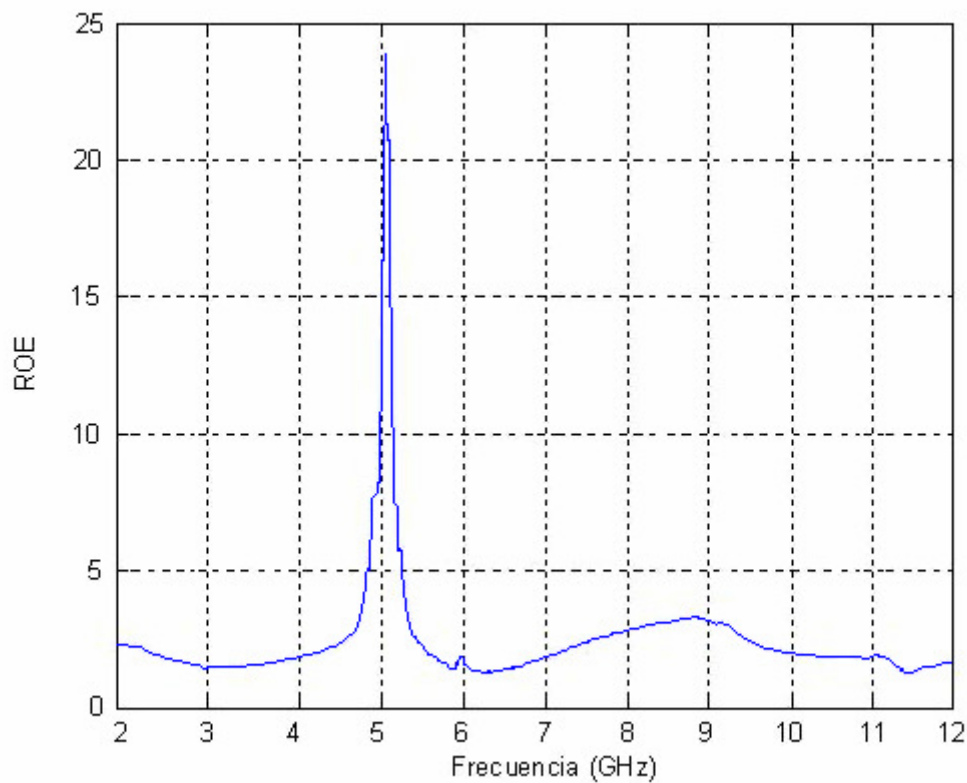


Figura 54. ROE de la primera antena con dos strips

A la vista de la figura, se observa cómo la ROE se hace muy alta en la frecuencia de 5 GHz, llegando a estar muy cerca de 25. Si se aprecia con más detenimiento, se puede afirmar que en la frecuencia de 6 GHz aparece otro posible pico, aunque su nivel es pequeño, no llegando ni siquiera a tener una ROE de 2.5, la décima parte del máximo absoluto.

Este es el resultado de tener dos strips de dimensiones similares, colocados en el centro de la antena, muy próximos y simétricos respecto al eje vertical. Por lo tanto, se estaría rechazando una sola banda de frecuencias, no siendo necesario el segundo strip introducido ya que no aporta ninguna ventaja respecto a lo ya estudiado.

En la Fig. 55 se muestra una segunda antena con dos strips. En este caso una de las tiras metálicas se ha desplazado 3 mm hacia valores negativos del eje  $y$ . Ambos strips conservan la equidistancia respecto al origen del eje  $x$ , estando separados un total de 3 mm.

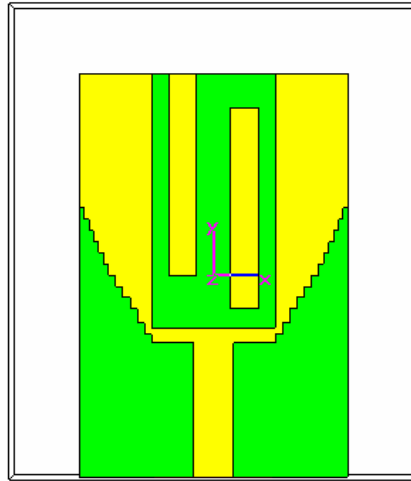


Figura 55. Segunda antena con dos strips

La ROE asociada a esta antena es la siguiente:

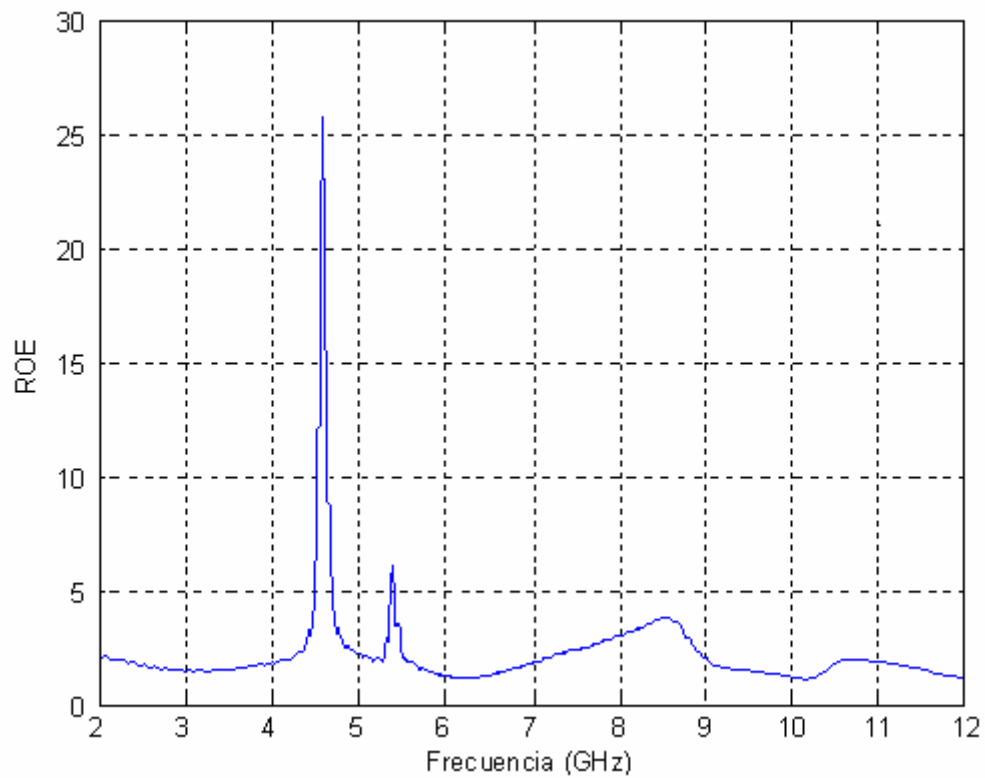


Figura 56. ROE de la segunda antena con dos strips

Como se aprecia en la figura, el máximo de esta gráfica es muy elevado con una ROE superior a 25 y coexiste con otro pico, más claramente diferenciado que en el caso anterior, alcanzando aproximadamente una ROE de 6. Estos picos están en las frecuencias de 4.6 GHz y 5.4 GHz respectivamente.

La siguiente simulación tiene lugar con ambos strips colocados muy próximos a ambos lados de la figura radiante, que según el diseño de nuestra antena tiene forma de U. En esta estructura también se ha modificado el largo de los strips, haciendo el izquierdo 3 mm más largo y cambiando el derecho hasta conseguir una longitud total de 22 mm.

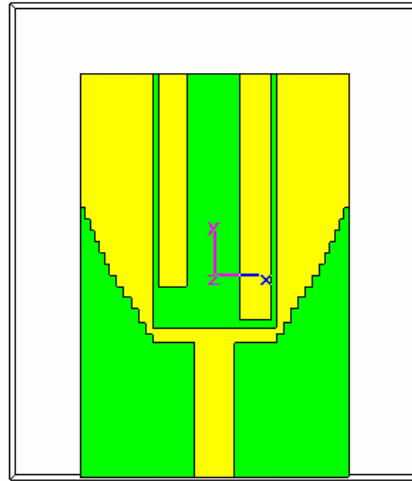


Figura 57. Tercera antena con dos strips

Se obtiene la ROE a partir del cálculo de los parámetros S:

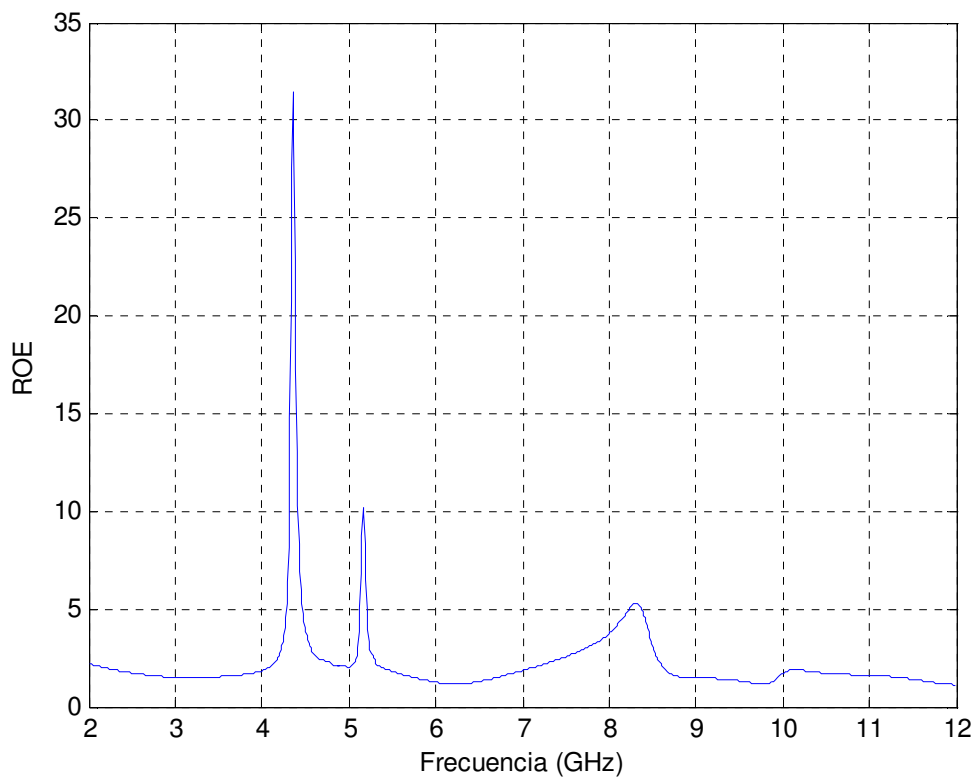


Figura 58. ROE de la tercera antena con dos strips

El resultado de esta disposición de strips es la existencia de dos máximos muy bien diferenciados en 4.3 GHz y 5.2 GHz, teniendo el primero de ellos una ROE muy alta (por encima de 30).

Se observa que a medida que se mejora el rechazo de ambas bandas, la ROE también aumenta en 8.3 GHz, siendo éste un signo de desadaptación en esa zona. Como consecuencia de esto se produciría una ligera pérdida de potencia.

Es en esta figura donde se observa la máxima separación entre las posibles bandas rechazadas (aproximadamente 1 GHz) ya que después de haber realizado varias pruebas con otras posiciones y tamaño de los strips, no se ha conseguido un resultado que permita una separación mayor.

Se concluye en este apartado que con la introducción de un segundo strip es posible pasar de tener un único rechazo de frecuencias a obtener una respuesta que filtra en dos bandas, con una separación máxima de 1 GHz entre ambas bandas rechazadas.



## Antena con tres strips

En esta parte del proyecto se añade un tercer strip a la estructura radiante cuya finalidad es comprobar si sería viable conseguir otra banda rechazada adicional de frecuencias.

Después de utilizar el simulador CST con diferentes antenas de tres strips, éstos en diferentes posiciones y tamaños, se observa que el resultado apenas varía, con lo que únicamente se mostrarán los resultados de un caso particular.

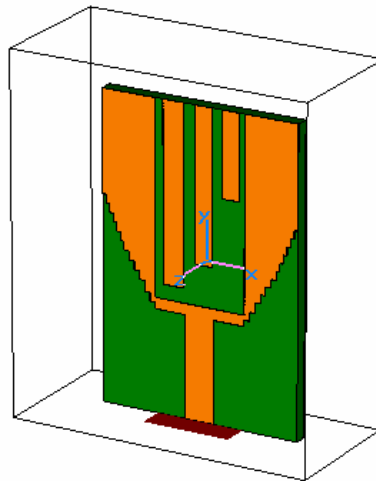


Figura 59. Vista en perspectiva de la antena con tres strips

El coeficiente de reflexión simulado es el que se muestra en la siguiente gráfica (ver Fig. 60) y del cual se extrae que existen dos resonancias alrededor de 5 GHz y que se produce un lento incremento del coeficiente en frecuencias superiores llegando a alcanzar los -5 dB. En esa zona de coeficiente de reflexión alto, se produciría de una pérdida de adaptación notable.

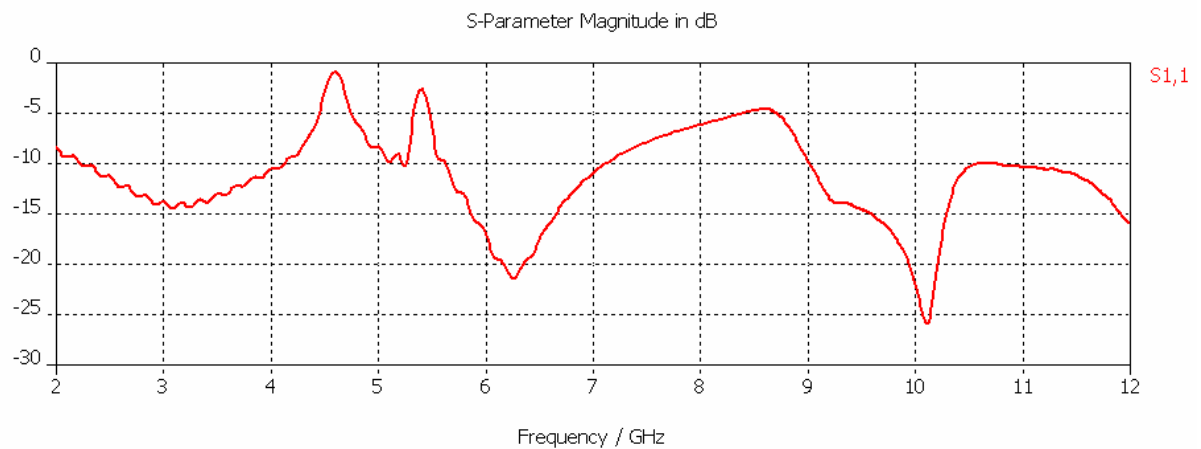


Figura 60. Parámetros S de la antena con tres strips

A partir de estos parámetros S o coeficiente de reflexión, se calcula la ROE con ayuda de Matlab, como se lleva haciendo durante cada uno de los apartados. En esta gráfica de la ROE (Fig. 61) se aprecia claramente dónde se encontrarán las bandas de frecuencias rechazadas.

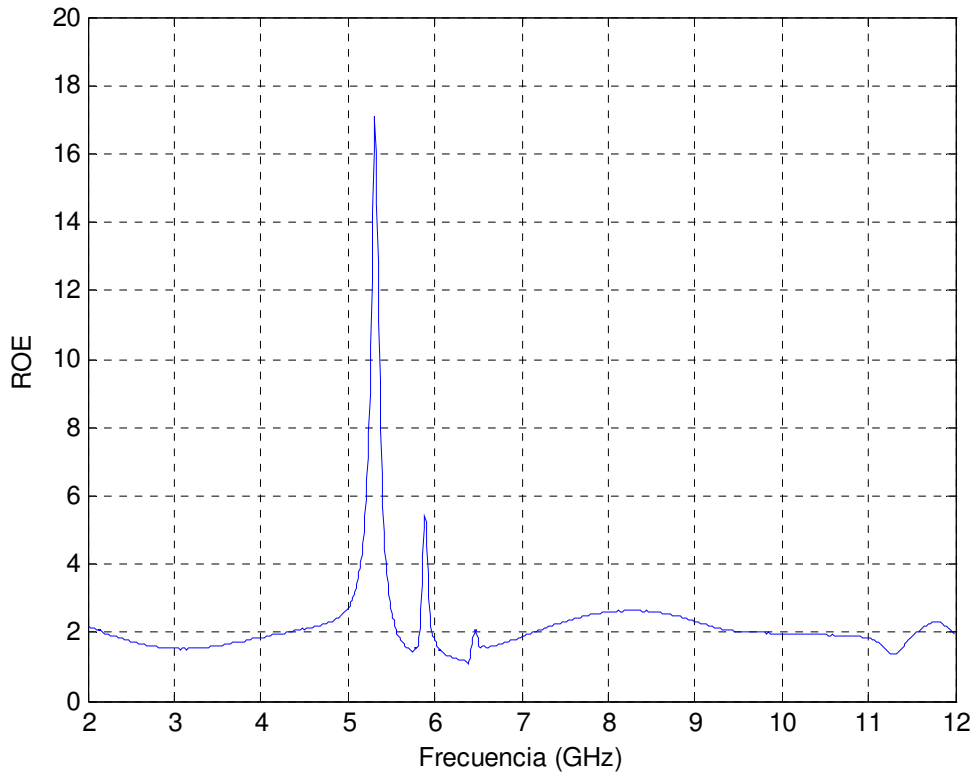


Figura 61. ROE de la antena con tres strips

Al observar la figura y, tras el análisis anterior de la gráfica de los parámetros S, se deduce que existen dos máximos bien diferenciados. Estos están situados en las frecuencias de 5.3 GHz y 5.9 GHz respectivamente.

El tercer máximo que se esperaba tener no se logra. Quizá éste se tratara del pico que aparece en 6.5 GHz pero con ninguna de las modificaciones realizadas para la simulación, se ha logrado que su ROE aumente. Una posible explicación para ello sería el espacio limitado de la estructura radiante de la antena, donde se colocan todos los strips.

La conclusión que se deduce del apartado presentado es que no se logrará más de una doble banda rechazada, a pesar de que se aumente el número de strips ya que no existe ningún punto más de la ROE que lo demuestre. Por lo tanto, el límite de bandas que se pueden rechazar para este tipo de antena se encuentra en dos.

# Capítulo 4

## Medida de las antenas y comparativa

### 4.1 Antena con un strip

Para completar este capítulo, gran parte del estudio ha transcurrido en el laboratorio. Tras el diseño de las antenas en capítulos anteriores, se ha procedido a la fabricación de dos prototipos para estudiar su comportamiento.

La primera antena se corresponde con la antena inicial, la misma que se incluye en el artículo sobre el que se ha basado el proyecto y sobre la cual se han llevado a cabo las modificaciones. La segunda es una antena con doble strip, cuya elección se ha efectuado para comprobar la viabilidad del rechazo de dos bandas de frecuencias.

Esta sección está dedicada únicamente a la medida y estudio de la primera antena señalada. El fin que se persigue es el de observar en el laboratorio cuál es el funcionamiento real de ésta y mostrar una comparación con las simulaciones realizadas sobre ella con el CST Studio Suite 2006.

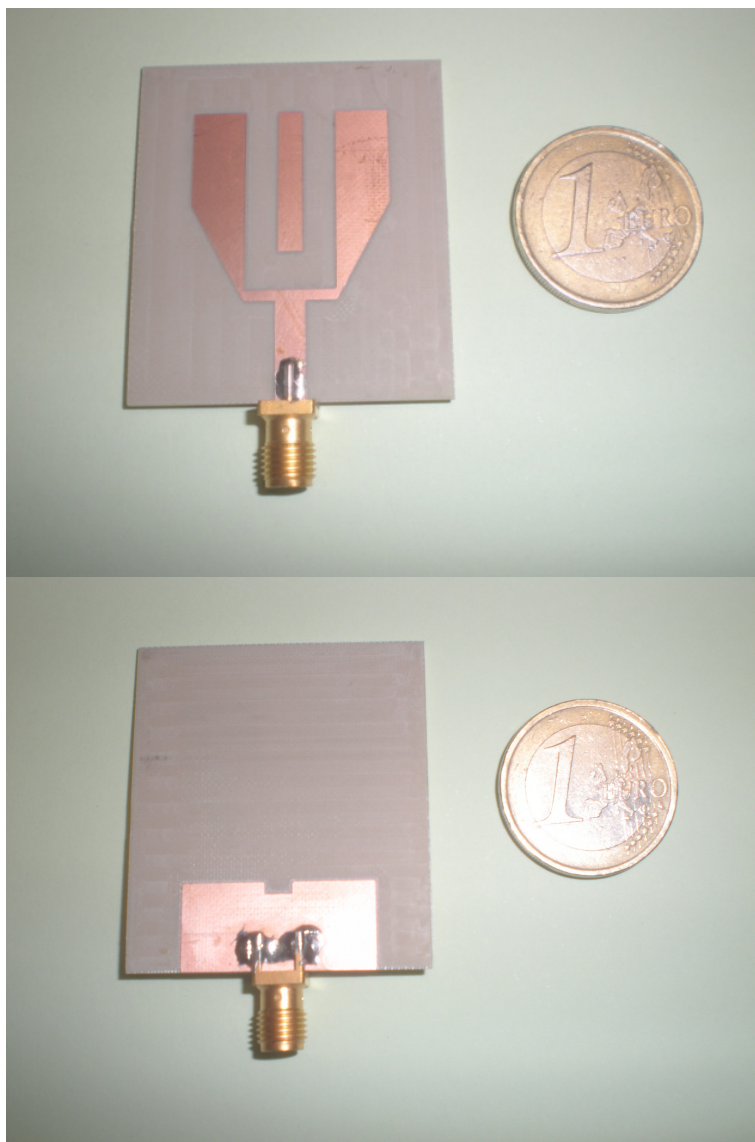


Figura 62. Antena con un strip: vista delantera y trasera

En la Fig. 62 se muestran las vistas delantera y trasera de la antena. En el plano trasero o plano de masa se aprecia claramente la presencia del notch y las dimensiones del mismo.

Tras su evaluación en el laboratorio y, por lo tanto, tras la obtención del coeficiente de reflexión en la banda entre 2 y 12 GHz, se genera la siguiente gráfica (Fig. 63) donde se muestra una comparación entre dicho coeficiente y el resultante de la simulación de la misma antena en el capítulo 2.

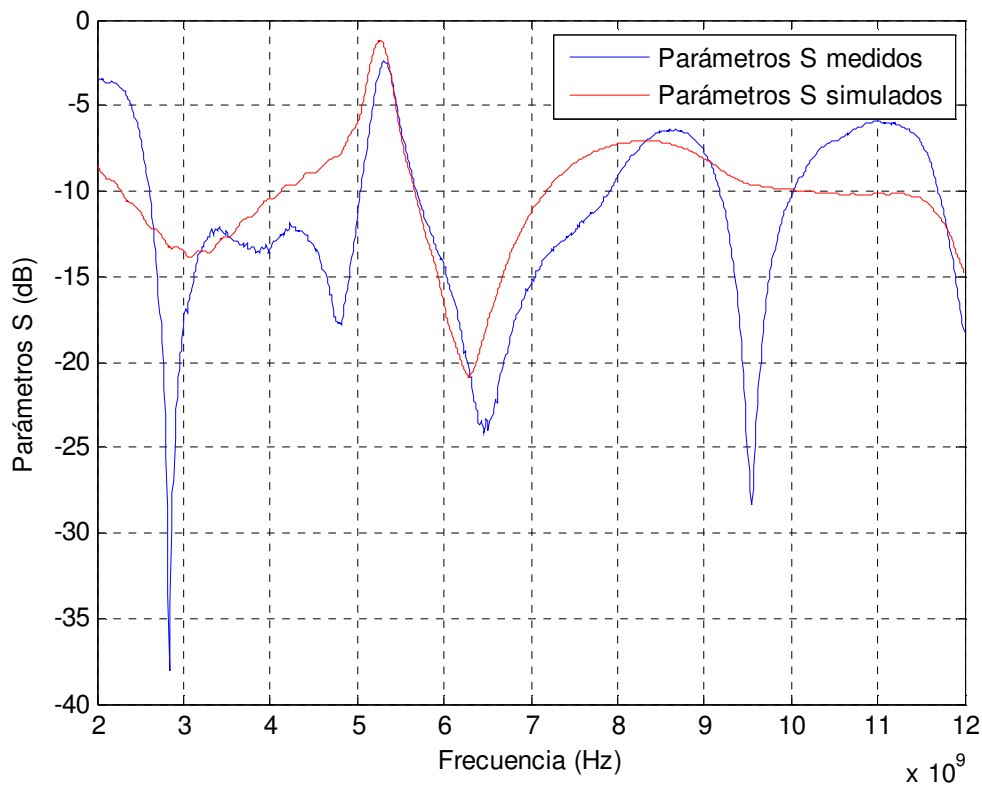


Figura 63. Parámetros S simulados y medidos de la antena con strip simple

A la vista de la figura, se aprecia que ambas curvas concuerdan a grandes rasgos. Entre las frecuencias de 5 GHz y 6 GHz, la simulación y la medida en el laboratorio de la antena se comportan del mismo modo, situándose en ambos casos la banda de frecuencia rechazada en torno a los 5.3 GHz.

Se observa en la Fig. 63 que la banda rechazada medida presenta un nivel de desadaptación elevado. La antena en frecuencias superiores está ligeramente más desadaptada que el resultado simulado.

La Fig. 64 muestra estos mismos parámetros con la singularidad del acotamiento entre los 4.5 GHz y 6 GHz. Como el equipo realiza la medida utilizando un número de puntos fijo, al estrecharse la banda a estudiar, se logra una precisión mayor. De esta manera, se observan mejor las diferencias entre ambos coeficientes de reflexión.

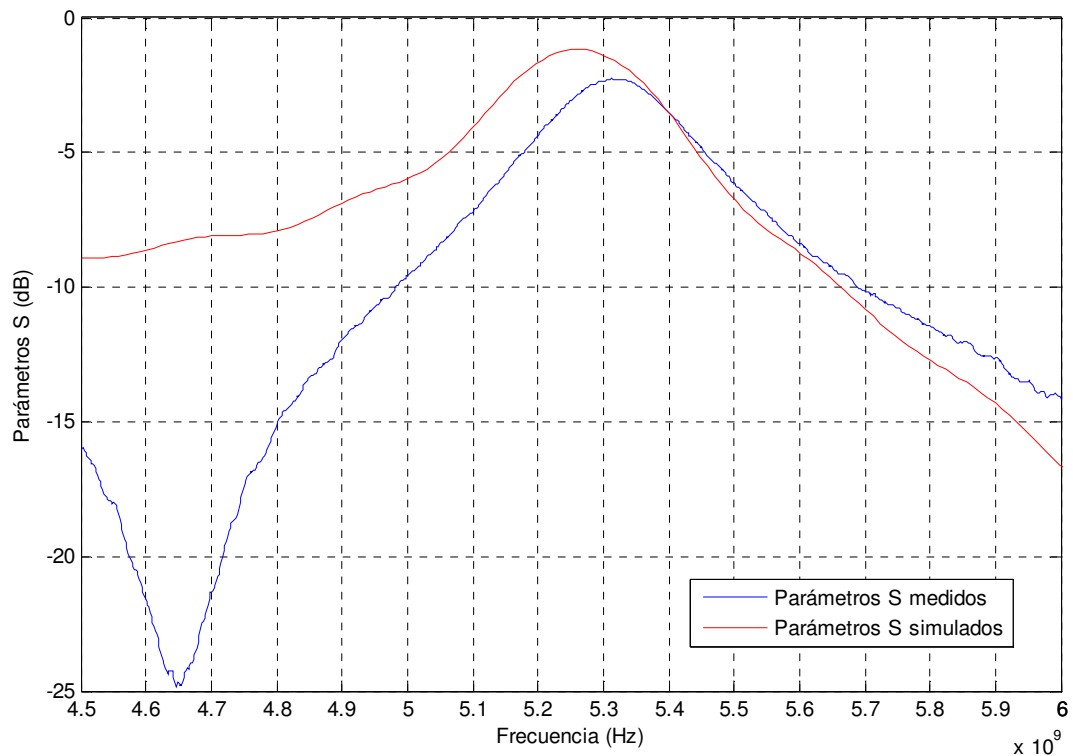


Figura 64. Parámetros S simulados y medidos de la antena con strip simple, entre 4.5 GHz y 6 GHz

Como ya se ha indicado, y según los parámetros S medidos, la zona de desadaptación es más estrecha, es decir, se produce en un menor rango de unidades de frecuencia. En la simulación se observa cómo incluso en 4.5 GHz hay una ligera desadaptación que no desaparecerá hasta aproximadamente 5.7 GHz.

Sin embargo, en los resultados medidos, la zona desadaptada comienza aproximadamente en 5 GHz y finaliza en 5.7 GHz. En conclusión, al medir la antena se comprueba que existe una mejor adaptación en esta zona, haciendo así la banda rechazada más estrecha.

## 4.2 Antena con doble strip

En este apartado, el prototipo de antena está formado por dos strips. En este caso la antena se corresponde con la antena de la Fig. 57, en cuyas simulaciones se observaba el rechazo de una doble banda de frecuencias. A continuación se exponen las fotografías de la parte delantera y trasera de la misma. Se puede apreciar el detalle de la posición y la longitud de los strips.

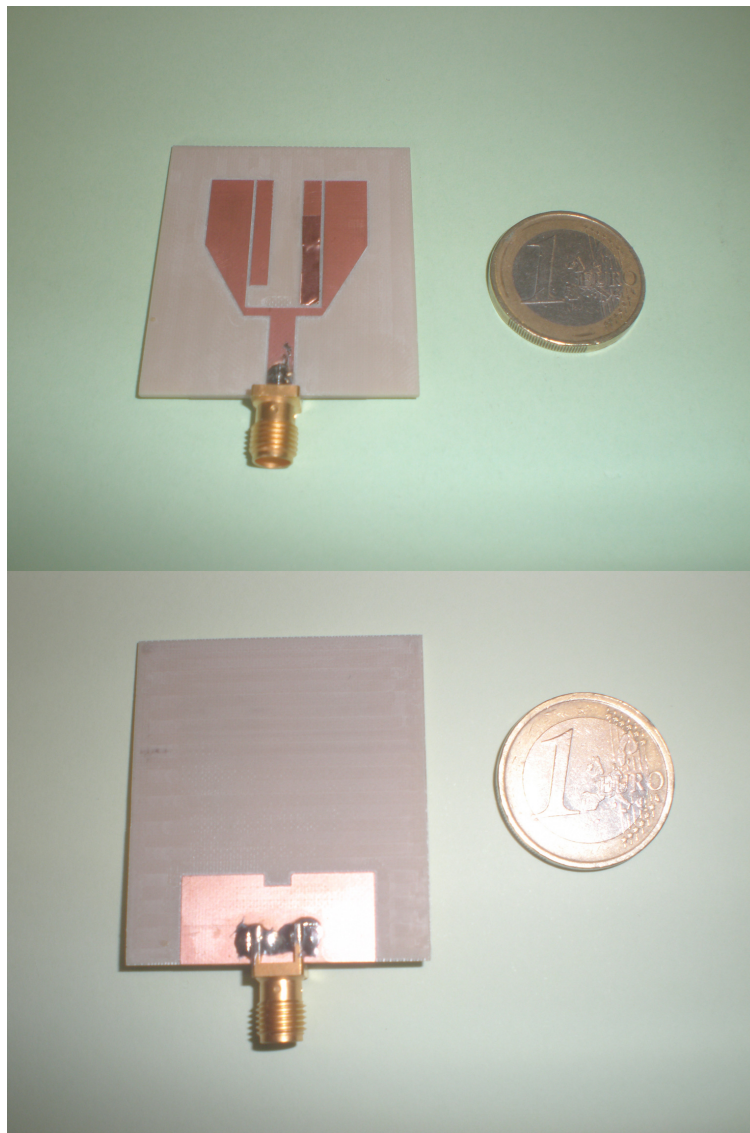


Figura 65. Antena con doble strip: vista delantera y trasera

La vista trasera es idéntica a la mostrada para la antenna del apartado anterior, es decir, tiene las mismas dimensiones y presenta el mismo notch, cuya misión es la de favorecer la adaptación.

Seguidamente se muestra la evolución de los parámetros S con respecto a la frecuencia. En la Fig. 66 se incluyen los parámetros medidos en el laboratorio y los que fueron simulados para esta misma antenna.

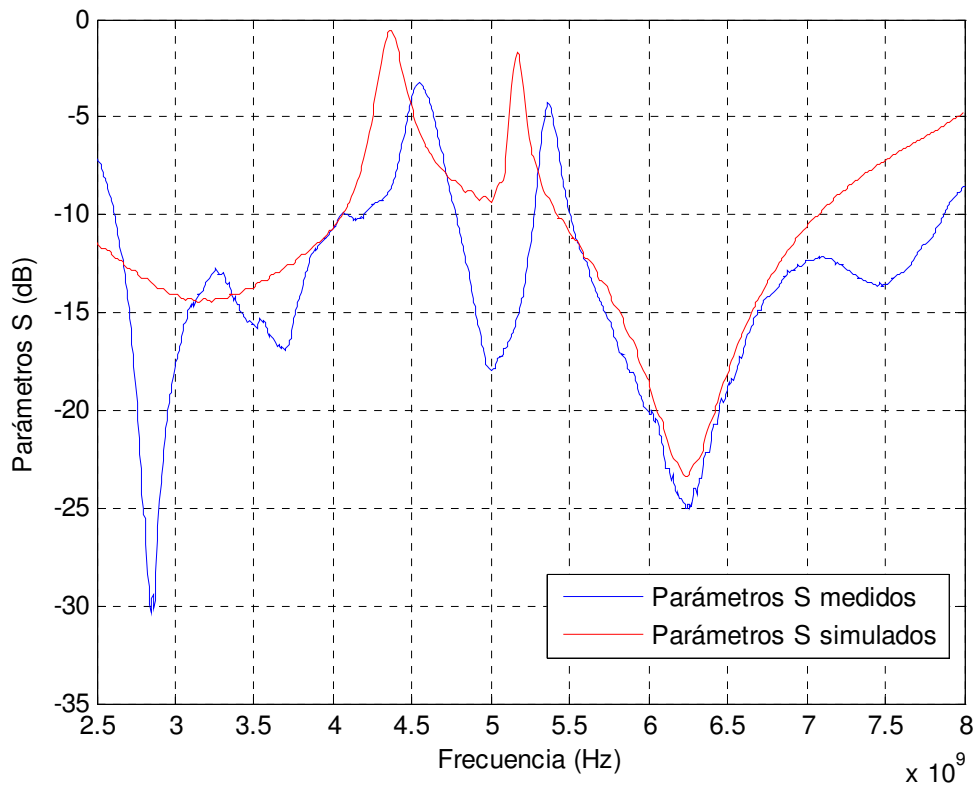


Figura 66. Parámetros S simulados y medidos de la antenna con doble strip

Comparando ambas curvas, se observa que son muy parecidas en cuanto a la posición de los máximos y mínimos. Otra similitud es que con estas respuestas se consigue una doble banda rechazada, como se quería demostrar con este ejemplo. La separación entre dichas bandas no llega en ningún caso a superar 1 GHz.

La diferencia que se podría resaltar es que en la simulación, las resonancias están desplazadas aproximadamente 200 MHz hacia la izquierda (frecuencias inferiores) con respecto al caso medido.

En cuanto a adaptación se refiere, en el caso medido se observa que la antenna está más adaptada en frecuencias superiores a 7 GHz, aunque la traza tiene un carácter ascendente, disminuyendo cada vez más su adaptación. También se observan dos resonancias con un espacio entre ellas de 500 MHz que está adaptado. Este último efecto no se logra observar en las simulaciones, como se puede apreciar en la figura.



En resumen, podemos afirmar que existe una gran similitud entre las simulaciones y las medidas, aunque se aprecian diferencias que son razonables para este tipo de diseños.

Por otro lado, hemos visto que para lograr doble banda rechazada es necesario que los dos strips de la antena posean una longitud significativa. Se ha comprobado en el laboratorio que si a uno de los strips se le va restando algunos milímetros de su longitud, cada vez rechaza peor las dos bandas de frecuencia, hasta llegar a una longitud en la que no se consigue esa segunda resonancia. Este hecho es coherente con lo visto en el capítulo 3.

También hay que destacar que la posición de la banda eliminada depende en gran medida de la longitud del resonador. Por último, es fundamental la posición de los strips para situar y obtener unas bandas rechazadas adecuadas.

# Capítulo 5

## Conclusiones y líneas futuras

### 5.1 Conclusiones

En el presente proyecto se han diseñado, simulado y construido varios prototipos de antenas impresas destinadas a trabajar en sistemas UWB. Debido al gran ancho de banda que se utiliza, se ha estudiado la incorporación de una o varias estructuras filtrantes a modo de resonadores, con el fin de evitar interferencias con otras tecnologías inalámbricas que pudiesen afectar al correcto funcionamiento de nuestro sistema.

Hemos comprobado, tanto con simulaciones como por medio de medidas, que la antena del artículo presenta un buen funcionamiento. Tiene una banda de trabajo muy ancha y, en gran medida, adaptada. Presenta una banda rechazada de frecuencias, la cual es resultado de la existencia de la tira metálica en la estructura radiante.

Tras las modificaciones que se han llevado a cabo, se ha deducido que la variación de la longitud del strip y, en cierta medida, su posición, permiten ajustar la banda de rechazo. Según se aumenta la longitud o se disminuye, esta banda se desplaza hacia frecuencias inferiores o superiores, respectivamente.

La banda rechazada no se puede situar en frecuencias tan pequeñas como se desee. Se ha observado que la longitud de la tira tiene un límite por debajo del cual deja de funcionar. Esto en la práctica limita la posición de la banda. Por lo tanto, esta longitud tiene que ser lo suficientemente grande para que el strip actúe como un resonador.

El ancho del strip no tiene ningún efecto para situar esta banda rechazada. La modificación de este parámetro, sin embargo, tiene utilidad para conseguir una mejor adaptación en el caso donde la tira metálica se haga más estrecha.

Con la eliminación de la ranura o notch del plano metálico trasero, se consigue que la antena pierda adaptación a lo largo de todas las frecuencias contenidas en su banda de trabajo.

Se ha logrado el rechazo de dos bandas frecuenciales, con la incorporación de un segundo resonador. Es importante recalcar que estas bandas no se pueden separar entre sí más de 1 GHz aproximadamente.

El resultado tras colocar tres strips en la estructura con diversas posiciones y tamaños, es la imposibilidad de rechazar tres bandas de frecuencia para este tipo de antena.

## 5.2 Líneas futuras

Debido a la juventud del sistema UWB, aún existen numerosos campos en los que investigar. Tras este proyecto aparecen varias líneas de investigación, a partir de las cuales continuar el trabajo.

Una primera continuación del trabajo sería profundizar en el estudio de la antena con la finalidad de conseguir una tercera banda rechazada de frecuencias. Para lograr este objetivo quizá se tendría que ampliar el tamaño de las antenas o modificar ligeramente su estructura.

Otro punto a considerar sería la modificación de la constante dieléctrica del sustrato. Esta constante suele estar en el rango  $2.1 < \epsilon_r < 12$  en antenas impresas aunque en algún diseño puede sobrepasar estos límites. Se podría utilizar una  $\epsilon_r$  menor a la que se proponía en el artículo ya que cuanto más baja sea favorecerá el ancho de banda y la eficiencia de la antena. De esta manera, habría que proceder a las correspondientes simulaciones y/o mediciones en el laboratorio para comparar los resultados con los actuales, observando las ventajas e inconvenientes que se han introducido. También sería un trabajo muy interesante el caracterizar la antena en radiación.

Otro de los trabajos posibles, sería el de mejorar la adaptación de la antena correctamente en todas las frecuencias de la banda de trabajo, sin que la/s banda/s rechazada/s pierdan su desadaptación característica.

En la mayoría de los casos estudiados se presentaba cierta desadaptación en frecuencias entre 7 GHz y 9 GHz, con lo cual sería interesante que desapareciese pues el resultado sería una antena con una amplia banda de trabajo adaptada, con excepción del rechazo frecuencial.

Este trabajo de adaptación podría comenzar por la modificación del tamaño del notch o de su colocación, ya que se ha visto que este elemento influye notablemente en la adaptación de la antena.

Por último, sería interesante un estudio dedicado a las posibles aplicaciones que esta antena podría tener en un futuro próximo, investigando tanto en el ámbito del hogar como de fuera de éste, así como también la coexistencia con otras tecnologías. Implementar aplicaciones y estudiar su comportamiento en algún uso particular es el modo de observar las características y el alcance de la tecnología UWB y sus antenas.



# Referencias

[Balanis; 2005] Constantine A. Balanis. *Antenna theory: analysis and design*. Third Edition. John Wiley & Sons, 2005.

[Barret; 2000] Terence W. Barrett. *History of UltraWideBand (UWB) Radar&Communications: Pioneers and Innovators*. 2000.

[Bataller, Blanch, Cardama, Jofre y Robert; 2002] Miguel Ferrando Bataller, Sebastián Blanch Boris, Ángel Cardama Aznar, Lluís Jofre Roca y Jordi Romeo Robert. *Antenas*. Ed. UPC, 2002.

[Guha y Antar; 2011] Debatosh Guha y Yahia M. M. Antar. *Microstrip and printed antenas. New trenes, techniques and applicatios*. John Wiley & Sons, 2011.

[Kraus; 1988] John D. Kraus. *Antennas*. Second Edition. McGraw-Hill, 1988.

[Millán; 2005] Ramón Jesús Millán Tejedor. *UWB: la revolución de las redes personales*. Comunicaciones World nº 200, IDG Communications S.A., 2005.

[Nekoogar; 2005] Faranak Nekoogar. *Introduction to Ultra-Wideband Communications: Fundamentals and Applications*. 2005.

[Nikookar y Prasad; 2009] Homayoun Nikookar y Ramjee Prasad. *Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications*. Ed. Springer, 2009.

[Oppermann, Hämäläinen e Inatti; 2004] I. Oppermann, M. Hämäläinen e Jari Inatti. *UWB Theory and Applications*. John Wiley & Sons, 2004.

[Ryu y Kishk; 2009] Kenny Seungwoo Ryu y Ahmed A. Kishk. *UWB Antenna With Single or Dual Band-Notches for Lower WLAN Band and Upper WLAN Band*. IEEE transactions on antennas and propagation , 2009.

[Shaalan y Ramadan; 2010] A. A. Shaalan y M. I. Ramadan. *Single and Dual Band-Notched UWB Monopole Antennas with U-Shaped Slot*. IEEE APS, 2010.

[Shen, Guizani y Caiming; 2006] Xuemin Shen, Mohsen Guizani, Robert Caiming. *Ultra-Wideband Wireless Communications and Networks*. John Wiley & Sons, 2006.

[Taylor; 2005] James D. Taylor. *Ultra-WideBand Radar Systems*. CRC Press, 1995.

[Waterhouse; 2007] Rod Waterhouse. *Printed Antennas for Wireless Communications*. John Wiley & Sons, 2007.

[Weng, Lu, Cheung y Yuk; 2009] Y. F. Weng, W.J. Lu, S. W. Cheung and T. I. Yuk. *UWB Antenna with Single or Dual Band-Notched Characteristic for WLAN Band using Meandered Ground Stubs*. IEEE, 2009.